

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALGORITHME D'ORDONNANCEMENT ET D'ACTIVATION DE LIENS DANS LES  
RÉSEAUX SANS FIL MAILLÉS BASÉS SUR LES SYSTÈMES MIMO

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR  
ABDELHALIM DRIOUECH

NOVEMBRE 2009

## UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Service des bibliothèques

### Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement n°8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

J'aimerais témoigner de ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Wessam Ajib, pour m'avoir donné la chance de travailler sur un sujet qui me passionnait. Son soutien, sa vision, sa clarté, son efficacité et sa détermination m'ont été très profitables à l'accomplissement de ce travail.

J'aimerais également remercier tous ceux et celles qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES . . . . .	v
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	vi
LISTE DES ACRONYMES . . . . .	vii
RÉSUMÉ . . . . .	viii
INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE I	
LES RÉSEAUX SANS FIL MAILLÉS . . . . .	7
1.1 Architectures des réseaux sans fil maillés . . . . .	7
1.1.1 Les WMNs basés sur une infrastructure . . . . .	9
1.1.2 Les WMNs basés sur des clients . . . . .	10
1.1.3 Les WMNs hybrides . . . . .	11
1.2 Pourquoi des réseaux sans fil maillés ? . . . . .	11
1.3 Applications des réseaux sans fil maillés . . . . .	14
1.4 Les réseaux sans fil maillés et les standards IEEE . . . . .	18
CHAPITRE II	
LES SYSTÈMES MIMO . . . . .	21
2.1 Capacité des systèmes MIMO . . . . .	22
2.1.1 Capacité de Shanon d'un lien SISO . . . . .	22
2.1.2 Capacité de Shanon d'un lien MIMO . . . . .	25
2.2 Les systèmes MIMO et les réseaux sans fil maillés . . . . .	34
2.3 Les systèmes MIMO dans les standards de communication sans fil . . . . .	35
CHAPITRE III	
ALGORITHME D'ORDONNANCEMENT AVEC CONTRAINTES D'ÉQUITÉ POUR LES WMNS . . . . .	37
3.1 Travaux connexes . . . . .	38

3.2	Modèle du système . . . . .	40
3.2.1	Modèle du réseau . . . . .	40
3.2.2	Modèle d'accès au canal . . . . .	42
3.2.3	Modèle d'interférence . . . . .	43
3.2.4	Modèle du canal . . . . .	43
3.3	L'algorithme d'ordonnancement . . . . .	46
3.3.1	La formulation du problème d'ordonnancement . . . . .	46
3.3.2	L'algorithme d'ordonnancement proposé . . . . .	48
 <b>CHAPITRE IV</b>		
<b>SIMULATIONS ET RÉSULTATS . . . . .</b>		<b>59</b>
4.1	Méthodologie de simulation . . . . .	59
4.1.1	Logiciel de simulation . . . . .	59
4.1.2	Paramètres de simulation . . . . .	59
4.1.3	Méthode de simulation . . . . .	60
4.2	Résultats numériques et discussion . . . . .	61
 <b>CONCLUSION . . . . .</b>		<b>66</b>
 <b>Bibliographie . . . . .</b>		<b>73</b>

## LISTE DES FIGURES

1.1	Les deux composantes d'un réseau sans fil maillé . . . . .	8
1.2	Les WMNs basés sur une infrastructure . . . . .	10
1.3	Les WMNs basés sur des clients . . . . .	11
1.4	Les WMNs hybrides . . . . .	12
1.5	Les WMNs dans l'accès à large bande au domicile (Akyildiz <i>et al.</i> , 2005) .	16
1.6	Les WMNs dans les réseaux d'entreprises (Akyildiz <i>et al.</i> , 2005) . . . . .	18
1.7	Le mode de communication PMP et le mode de communication maillé . .	19
2.1	Système de communication SISO avec canal à évanouissement . . . . .	24
2.2	Système de communication MIMO . . . . .	25
2.3	Transformation au niveau de l'émetteur et le récepteur SVD . . . . .	27
2.4	Les sous-canaux parallèles résultant de la décomposition SVD . . . . .	29
2.5	Les variables considérées dans une itération de l'algorithme Water Filling	32
3.1	Un réseau sans fil maillé de topologie chaîne avec $N = 5$ . . . . .	40
3.2	Un réseau sans fil maillé de topologie chaîne avec $N = 5$ servant plusieurs clients mesh en utilisant deux canaux . . . . .	41
3.3	Un réseau sans fil maillé de topologie grille avec $N = 9$ . . . . .	42
3.4	Les configurations possibles pour un réseau de topologie chaîne avec $N = 5$	49
4.1	Débit par lien vs. SNR pour une topologie chaîne . . . . .	61
4.2	Le débit réseau vs. SNR pour la topologie chaîne et la topologie grille . .	63
4.3	Nombre de TSs dans une trame vs. le nombre de nœuds dans le réseau pour $SNR = 10$ . . . . .	64
4.4	Le débit réseau vs. SNR( $N = 5$ and $M = 4$ ) . . . . .	65

## LISTE DES TABLEAUX

3.1	Les variables utilisées dans l'algorithme d'ordonnancement . . . . .	57
3.2	L'algorithme d'ordonnancement . . . . .	58

## LISTE DES ACRONYMES

- VLSI** Very-large-scale integration (Intégration à très grande échelle).
- CDMA** Code Division Multiple Access (Accès multiple par répartition en code).
- IS-95** Interim Standard 95 (Le premier standard basé sur le CDMA).
- WMN** Wireless Mesh Network (Réseau sans fil maillé).
- MIMO** Multiple-Input Multiple-Output (Système de communication sans fil à entrées multiples, sorties multiples).
- SVD** Singular Values Decomposition (Décomposition en valeurs singulières).
- STDMA** Space-Time Division Multiple Access (Accès multiple par division de l'espace et du temps).
- MAC** Media Access Control (Contrôle d'accès au support ).
- xDSL** x Digital Subscriber Line (Ligne numérique d'abonné).
- ISP** Internet Service Provider (Fournisseur d'accès à Internet).
- PDA** Personal Digital Assistant (Ordinateur de poche).
- WLAN** Wireless Local Area Network (Réseau local sans fil).
- WPAN** Wireless Personal Area Network (Réseau personnel sans fil).
- PMP** Point-to-multipoint (mode de communication point à multi point).
- SISO** Single Input Single Output (Système de communication à simple antenne).
- AWGN** Additive White Gaussian Noise (Bruit blanc additif gaussien).
- SNR** Signal to Noise Ratio (Rapport signal sur bruit).
- SINR** Signal to Interference and Noise Ratio (Rapport signal sur bruit et interference).
- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project.
- FDMA** Frequency Division Multiple Access (Accès multiple par multiplexage en fréquence).
- TDMA** Time Division Multiple Access (Accès multiple par multiplexage temporel).



## RÉSUMÉ

Les réseaux sans fil maillés (Wireless Mesh Networks) sont considérés comme l'une des solutions les plus prometteuses pour améliorer la couverture réseau et accroître le nombre de clients partageant un accès sans fil à large bande (Wireless broadband access). L'introduction des systèmes de communication sans fil à antennes multiples appelés communément MIMO au niveau de la couche physique des réseaux WMNs permet d'élever les performances en termes de débit maximal et ainsi supporter un plus grand nombre de clients. Ceci dit, l'absence d'un algorithme d'ordonnancement et d'activation de liens au niveau de la couche d'accès au support partagé (MAC) pour un réseau sans fil maillé basé sur des liens MIMO résulte en des inégalités entre les clients en termes de débit de transmission et conduit par conséquent à des faibles performances du système. Dans le but d'éviter cela, ce travail propose un algorithme d'ordonnancement et d'activation de liens pour les réseaux sans fil maillés basé sur des liens MIMO. L'ordonnanceur assure une équité entre les nœuds du réseau, améliore l'efficacité spectrale et le débit maximal atteint par le réseau. Les simulations présentées démontrent que l'algorithme proposé permet de réaliser un débit plus élevé qu'une solution d'ordonnancement opportuniste basé sur une méthode d'accès par multiplexage temporel (TDMA). En le comparant à la recherche exhaustive qui constitue la solution théorique (non pratique) et optimale au problème d'ordonnancement considéré, il s'est avéré que notre algorithme d'ordonnancement permet d'atteindre un débit proche du débit réalisé par la recherche exhaustive malgré que la complexité algorithmique de cette dernière soit beaucoup plus élevée que celle de notre solution.

**Mots clés :** Algorithmes d'ordonnancement, Réseaux sans fil maillés, Systèmes de communication sans fil MIMO, Capacité de Shannon, Simulation des réseaux.

## INTRODUCTION

La décennie précédente a connu une poussée sans précédent dans le domaine des communications sans fil en termes de recherches. Ces dernières ont démontré les potentialités des communications sans fil comme un nouveau modèle de communication à part ou bien une extension pour les communications filaires déjà existantes. De nos jours, les avancées dans le secteur de la communication sans fil vont à un rythme très rapide et ce nouveau monde de communication attire de plus en plus de chercheurs et d'industriels. Ce développement accéléré et cette effervescence autour de la communication sans fil est le résultat de plusieurs paramètres. Le premier est sans doute le besoin ressenti par les utilisateurs des réseaux filaires pour une connexion sans contrainte du câble. Ce besoin a été renforcé par la démocratisation des différents appareils mobiles, notamment les téléphones cellulaires. Deuxièmement, le progrès marquant réalisé dans la technologie VLSI qui a ouvert les portes à l'implémentation d'algorithmes complexes de traitement de signal et de codage numérique sur des appareils de petite taille. Le dernier paramètre est le succès des standards sans fil de la deuxième génération (2G), notamment le standard IS-95. Ce succès a démontré que les bonnes idées émanant de la théorie de l'information peuvent donner d'excellents résultats dans la pratique (Tse et Viswanath, 2005).

Les appareils mobiles par ex. les ordinateurs portables, les ordinateurs de poches, les téléphones cellulaires ne sont plus des outils de luxes réservés à une minorité. Présentement, ces appareils sont devenus des instruments de la vie quotidienne indispensables tant sur le plan personnel que professionnel. Une grande partie de ce que nous pouvons faire de l'ordinateur de notre bureau, nous pouvons actuellement le faire en déplacement à partir de notre ordinateur portable, ordinateurs de poches et même de notre téléphone cellulaire. Cette invasion des appareils mobiles de notre vie quotidienne couplée à la croissance rapide des communications sans fil constatée notamment durant la dernière décennie nous laisse sans aucun doute quant au futur florissant des communications sans fil. Des chercheurs et des industriels s'intéressent aux communications sans fil aussi pour les défis qu'elle offrent. En effet, deux principaux aspects de la communication sans fil

continuent à motiver et à passionner les chercheurs. Premièrement, le phénomène de l'évanouissement qui engendre des variations de la qualité du canal radio durant les transmissions des données. Ainsi, le canal peut être bon ou mauvais dépendamment du niveau de l'évanouissement qu'il subit. Nous pouvons ici faire l'analogie avec le monde de l'électricité où nous parlons de bon conducteur et de mauvais conducteur à la seule différence que dans le domaine de la communication sans fil, le même canal radio peut changer d'état avec le temps. Deuxièmement, contrairement aux communications filaires où une paire émetteur-récepteur peut être considéré comme un lien point à point isolé, dans le monde de la communication sans fil, les nœuds communiquent en diffusant les données par un média radio partagé. Par conséquent, le phénomène d'interférence peut exister entre les différents paires émetteur-récepteur. Quelles sont les techniques à employer afin de faire face à ces deux problèmes est une question centrale dans le domaine de la communication sans fil.

Une partie de la réponse est donnée par les réseaux sans fil maillés (WMN). Ce type de réseau est généralement utilisé comme une dorsale sans fil (Dans la suite de ce document nous utilisons aussi le terme '*backbone d'accès sans fil*' pour désigner la dorsale sans fil). Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels où les stations de base communiquent par des liens filaires, dans les WMNs les stations de base appelées aussi routeurs mesh utilisent des liens radio. Cette spécificité simplifie considérablement l'installation, la modification et la maintenance des WMNs et réduit le coût de celles-ci par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. En outre, les WMNs emploient la communication multi saut (multi-hop networking), ce qui a pour conséquence l'amélioration de la flexibilité et la couverture radio du réseau et l'économie de l'énergie au niveau des routeurs mesh. Actuellement, les WMNs commencent à remplacer les infrastructures de communication traditionnelles dans plusieurs type d'applications notamment au niveau des fournisseurs d'accès à Internet. Ces mêmes réseaux ont ouvert la porte à de nouvelles applications qui n'étaient pas envisageables.

La communication multi-saut utilisée dans les WMNs permet de réduire l'impact de l'interférence. En effet, la nature de la communication multi saut fait en sorte qu'il y

ait plusieurs chemins redondants entre deux nœuds dans un réseau. Ainsi, les chemins contenant des transmissions qui subissent une forte quantité d'interférence sont évités en utilisant les chemins alternatifs. Ces derniers peuvent aussi être utilisés afin d'éloigner géographiquement les transmissions simultanées. Procéder de la sorte permet de réduire l'impact de l'interférence qui constitue un problème majeur dans le domaine de la communication sans fil.

Dans le passé, les recherches dans le domaine de la communication sans fil visaient principalement l'augmentation de la fiabilité en minimisant la quantité de données perdues sur le canal radio. Dans ces recherches, l'aspect de l'évanouissement était considéré comme un handicap. Récemment, les chercheurs se sont tournés vers un autre but qui consiste à l'augmentation de l'efficacité spectrale (spectral efficiency) du canal radio. Ce changement d'objectif est le résultat direct du besoin d'augmenter le débit des systèmes de communications sans fil notamment après la démocratisation des appareils mobiles et la multiplication de la quantité de données destinées à être transportées sur les réseaux sans fil. Dans la quête incessante pour atteindre ce nouveau but, les systèmes de communication sans fil à antennes multiples appelés communément MIMO pour 'Multiple Input Multiple Output' sont nés.

Contrairement aux systèmes de communication traditionnels où l'émetteur et le récepteur utilisent une seule antenne, dans les systèmes MIMO chacun des deux bouts d'une transmission dispose de plusieurs antennes. Grâce à ces antennes, les systèmes MIMO introduisent une nouvelle dimension spatiale qui s'ajoute à la dimension temporelle traditionnellement présente dans le traitement des signaux numériques. Cette nouvelle dimension donne aux systèmes MIMO la possibilité de tirer avantage du phénomène de l'évanouissement considéré habituellement comme un handicap pour les transmissions sans fil. En effet, les recherches présentées dans (Telatar, 1999), (Foschini, 1996) et (Foschini et Gans, 1998) ont démontré que les systèmes MIMO sont capables d'améliorer significativement le débit sans accroître la bande passante radio ni dépenser plus de puissance d'émission en comparaison aux systèmes de transmission traditionnels.

La technologie MIMO peut être implémentée au niveau de la couche physique des réseaux sans fil maillés. Une telle combinaison est très bénéfique. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, les WMNs sont généralement utilisés comme des dorsales d'accès sans fil et par conséquent, ils sont le point de concentration et de transit d'une importante quantité de données. Les systèmes MIMO peuvent être utilisés dans ce cas pour améliorer le débit des transmissions et ainsi permettre au réseau de servir un plus grand nombre de clients en respectant la qualité de service requise par les applications clients. En outre, les systèmes MIMO permettent au réseau WMN de couvrir une plus grande zone radio et de tirer avantage du phénomène de l'évanouissement, notamment dans les milieux urbains.

En dépit de tous les avantages offerts par la combinaison des réseaux sans fil maillés et la technologie de communication MIMO, le phénomène de l'interférence entre les communications persiste. Malgré que les WMNs peuvent réduire l'impact de l'interférence, cette dernière demeure existante dans le cas des réseaux qui doivent supporter une grande quantité de données comme dans les dorsales d'accès sans fil. Cette situation conduit généralement à la diminution des performances et dans les cas extrêmes à l'écroulement total du réseau. Dans le but de pallier à ce problème et de profiter au maximum des avantages des réseaux sans fil maillés et les systèmes MIMO présents au niveau de la couche physique, un algorithme d'ordonnancement efficace au niveau de la couche MAC est indispensable.

Notre travail consiste à développer un algorithme d'ordonnancement pour les réseaux sans fil maillés basés sur des liens MIMO. L'algorithme d'ordonnancement utilise la technique SVD (Singular value decomposition) et le Water Filling respectivement pour la décomposition du canal radio original en une suite de sous-canaux parallèles non interférents et la distribution la puissance disponible au niveau de l'émetteur sur ces sous-canaux. Nous utilisons la méthode d'accès multiple STDMA (Space-Time Division Multiple Access) qui va nous permettre d'activer plusieurs liens du réseaux simultanément dans le but d'améliorer l'utilisation de la bande radio disponible. L'ordonnanceur décide du scénario d'activation des différents liens dans le réseau en vue d'atteindre deux objectifs. Le premier est l'amélioration du débit maximum que le réseau peut atteindre

et ceci en minimisant l'impact de l'interférence. Le deuxième, une garantie sur l'équité entre les différents nœuds du réseau. En effet, l'équité est un élément crucial dans les réseaux utilisant la communication multi-sauts car la quantité de données qu'un nœud peut transmettre est entièrement dépendante de la quantité de données que ses voisins peuvent transférer. Donc la capacité total du réseau est dans ce cas conditionnée par les liens ayant le débit de transmission le moins élevé. Ces liens sont considérés dans ce cas comme des goulots d'étranglement que l'équité peut éliminer et ainsi améliorer les performances du réseau.

Nous avons réalisé des simulations en appliquant notre algorithme en considérant plusieurs topologies d'un réseau sans fil maillé basé sur des liens MIMO. Les résultats démontrent que l'algorithme d'ordonnancement assure l'équité entre les différents nœuds du réseau (les routeurs mesh sont appelés nœuds dans notre proposition) et améliore considérablement le débit atteint par celui-ci. Nous avons comparé notre proposition à la solution optimale qui représente une borne supérieure théorique à notre problème d'ordonnancement et qui est pratiquement irréalisable. Nous avons constaté que notre algorithme d'ordonnancement permet de réaliser un débit qui s'approche de celui atteint par la solution optimale bien que la complexité algorithmique de notre algorithme soit nettement plus basse que celle de la solution optimale.

L'algorithme d'ordonnancement proposé dans ce document ainsi que les résultats obtenus nous ont permis de rédiger un article scientifique (Driouech *et al.*, 2009). Ce dernier a été accepté dans une conférence scientifique internationale prestigieuse : IEEE International Symposium on Computer and Communications ISCC'09.

Le reste du document est organisé comme suit : dans le premier chapitre nous introduisons les réseaux sans fil maillés. Nous détaillons les architectures des WMNs et décortiquons les différences entre les WMNs et les réseaux sans fil traditionnels. Nous présentons aussi les améliorations apportées par les WMNs par plusieurs cas d'utilisation. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous énumérons les applications qui peuvent utiliser les WMNs comme infrastructure de communication et nous exposons les stan-

dards de communication sans fil développés autour des WMNs. Le deuxième chapitre sera consacré aux systèmes MIMO. Nous nous intéressons tout particulièrement à la notion de la capacité qui constitue la métrique principale pour l'évaluation des performances d'un système de communication sans fil. Nous exposons les résultats de la théorie d'information, notamment la relation de la capacité de Shanon. Par cette notion de capacité, nous montrons les améliorations en termes de performances apportées par les systèmes MIMO. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous étudions l'implémentation des systèmes MIMO au niveau de la couche physique des WMNs. Dans le troisième chapitre nous exposons en détail l'algorithme d'ordonnancement proposé. Nous commençons ce chapitre en présentant le modèle du système, ensuite nous formulons le problème d'ordonnancement et précisons les objectifs que l'algorithme doit atteindre. Suite à cela, nous détaillons les différentes étapes menant à la solution du problème d'ordonnancement et à la réalisation des objectifs. Finalement, nous procédons à l'évaluation de notre solution d'ordonnancement par des simulations. Ces dernières sont réalisées en utilisant le logiciel MATLAB qui dispose d'une riche bibliothèque pour les calculs matriciels. Ces derniers sont très importants pour la simulation des systèmes MIMO. Le logiciel MATLAB est très utilisé dans le domaine de la recherche sur les systèmes de communications sans fil surtout quand il s'agit de travaux sur la couche physique et la couche MAC.

## CHAPITRE I

### LES RÉSEAUX SANS FIL MAILLÉS

Les réseaux sans fil maillés (Wireless Mesh Networks) sont considérés de nos jours comme une nouvelle solution prometteuse pour supporter plusieurs applications, par ex., le réseautage large bande sans fil à domicile (broadband home networking), les systèmes de transport intelligents (intelligent transportation systems), la connectivité des zones rurales. Les WMNs intéressent particulièrement les fournisseurs d'accès à Internet pour garantir une connexion large bande sans fil robuste et fiable à un coût raisonnable. Dans ce domaine, les WMNs sont en compétition avec les technologies déjà existantes à savoir, le xDSL, l'accès large bande avec boucle locale radio (broadband wireless local loop) et l'accès à internet par satellite (Jangeun et Sichitiu, 2003). Un réseau sans fil maillé est composé de deux types de nœuds : les clients mesh et les routeurs mesh. Ces derniers construisent un réseau dorsal sans fil qu'un client mesh peut utiliser pour accéder à Internet ou simplement pour communiquer avec d'autres clients. En outre, les routeurs mesh établissent et maintiennent automatiquement la connectivité dans le dorsale, ce qui augmente la fiabilité et la robustesse du réseau. Un autre point fort des réseaux sans fil maillés est l'utilisation de la communication sans fil multi-saut entre les routeurs mesh (Multi-Hop Networking). Cette caractéristique améliore grandement la couverture radio du réseau. Dans ce chapitre, nous exposons les différentes architectures des réseaux sans fil maillés et nous montrons l'importance de ce type de réseau par plusieurs cas d'utilisation. Nous détaillons comment les WMNs améliorent le débit et la couverture radio et réduisent les coûts d'installation et de maintenance. Nous nous intéressons à la fin de ce chapitre aux standards développés autour des WMNs.

#### 1.1 Architectures des réseaux sans fil maillés

Un réseau sans fil maillé contient deux types de nœuds : les routeurs mesh et les clients mesh. Les routeurs mesh forment une dorsale sans fil que les clients mesh utilisent pour accéder à Internet ou pour communiquer entre eux. La Figure 1.1 montre l'archi-



architecture d'un réseau sans fil maillé en distinguant entre les routeurs mesh et les clients mesh. À la différence de l'approche traditionnels où les nœuds du dorsale communiquent via des liaisons souvent câblés, dans les WMNs les routeurs mesh sont reliés par des liens radio. Cette caractéristique facilite l'installation et la maintenance des WMNs et diminue également le coût de ce type de réseau. En outre, les routeurs mesh opèrent en utilisant des communications multi-saut (Multi-Hop Networking), ainsi les données des clients sont envoyées de proche en proche jusqu'à la destination. Dans un réseau sans fil maillé, un ou plusieurs routeurs mesh intègrent les fonctionnalités d'une passerelle/pont (Gateway/Bridge)(voir Figure 1.1) afin de permettre aux clients d'accéder à Internet ou communiquer avec d'autres clients se trouvant sur d'autres réseaux, par ex., réseaux WiMax, réseaux cellulaires, réseaux Wi-Fi (Akyildiz *et al.*, 2005).

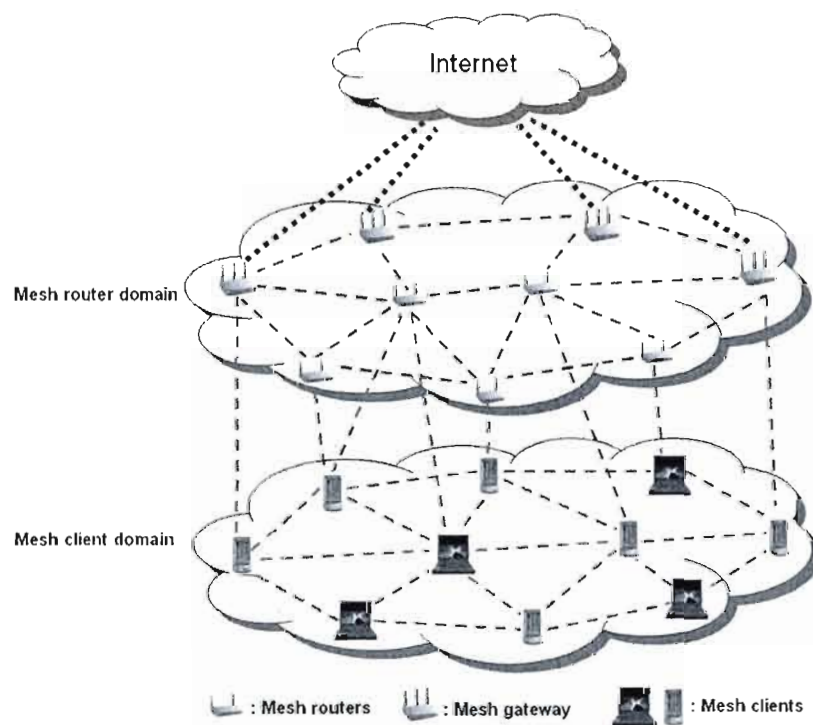


FIG. 1.1: Les deux composantes d'un réseau sans fil maillé

En combinant les WMNs avec des techniques radio émergentes comme les systèmes à antennes multiples appelés communément MIMO (le chapitre suivant présentera en

détail la technologie MIMO), leur capacité peut être améliorée. Cependant, cela nécessite le développement de nouveaux protocoles et standards au niveau de la couche MAC (Akyildiz *et al.*, 2005).

Physiquement, un routeur mesh est typiquement une boîte dédiée seulement aux fonctionnalités du routage. Nous pouvons aussi intégrer les fonctionnalités d'un routeur mesh dans un système informatique (ordinateur personnel, ordinateur portable, etc). Cependant, il existe plusieurs arguments contre l'utilisation de vieux portables comme routeurs mesh, notamment la consommation élevée d'énergie. Il existe aussi des solutions logiciels pour les routeurs mesh comme Zebra/Quagga (GNU Zebra, 2005) (Quagga software routing suite, 2008) ou CUWin (CUWin Community Wireless Solutions, 2006). En ce qui concerne l'architecture des réseaux sans fil maillés, nous pouvons distinguer principalement trois types à savoir : les WMNs basés sur une infrastructure (Infrastructure/Backbone WMNs), les WMNs basés sur les clients (Client WMNs) et les WMNs hybrides (Hybrid WMNs). Dans ce qui suit nous allons détailler ces différentes architectures.

#### 1.1.1 Les WMNs basés sur une infrastructure

Comme illustré dans la Figure 1.2, l'ensemble des routeurs mesh constituent une dorsale sans fil de communication (Wireless Backbone). Les clients utilisent cette dorsale pour accéder à Internet ou pour communiquer entre eux. La dorsale est auto-configurable ; ainsi, s'il y a une défaillance au niveau d'un routeur ou bien sur un lien, les routeurs mesh s'organisent pour router les données via un chemin alternatif. Principalement, la technologie radio utilisée dans la dorsale est l'IEEE 802.11, cependant, les routeurs mesh peuvent interconnecter des clients appartenant à plusieurs type de réseaux, par ex., réseaux Wi-Max, réseaux cellulaires, réseaux Wi-Fi, réseaux de capteurs (sensor networks). Les clients utilisant la même technologie radio que la dorsale communiquent directement avec les routeurs mesh alors que les autres clients doivent passer par les stations de base (base station) disponibles au niveau de leurs réseaux pour avoir accès au dorsale (voir Figure

1.2). Les clients possédant des interfaces Ethernet peuvent aussi communiquer avec les routeurs mesh via des liens Ethernet.

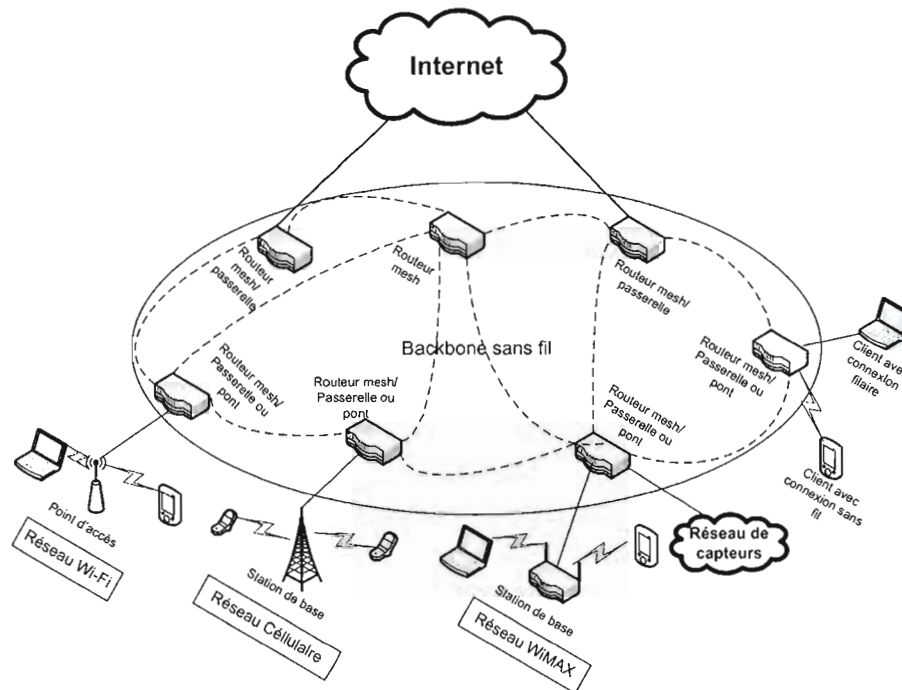


FIG. 1.2: Les WMNs basés sur une infrastructure

### 1.1.2 Les WMNs basés sur des clients

Dans cette architecture, le réseau est composé seulement de clients mesh (la composante routeur mesh n'existe pas). C'est aux clients mesh du réseau qu'incombe la responsabilité de router les données. Donc, chaque client joue le rôle d'un routeur mesh qui sert les autres clients dans le réseau. La Figure 1.3 illustre un WMN basé sur des clients. Dans une transmission, un client mesh peut être la source des données, la destination des données ou juste un routeur mesh. Les clients assurent aussi l'auto-configuration en cas de défaillance. Il est évident que dans ce type d'architecture les clients mesh ont plus de fonctions à accomplir et doivent intégrer les mécanismes nécessaires au routage des données et à l'auto-configuration du réseau. Cette architecture des WMNs est équivalente à un réseau adhoc (Hekmet, 2006).

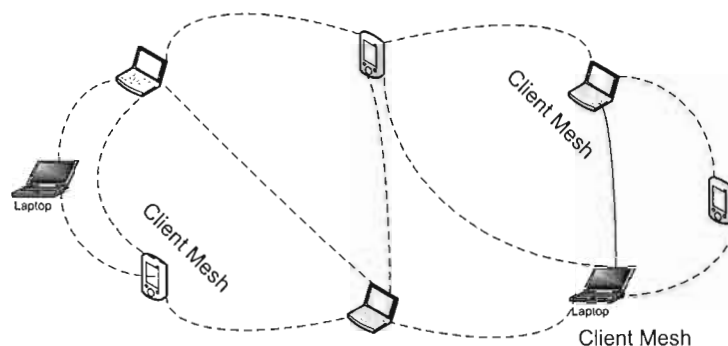


FIG. 1.3: Les WMNs basés sur des clients

### 1.1.3 Les WMNs hybrides

Ce dernier type d'architecture combine les deux précédentes. Il essaye de rassembler les avantages des WMNs basés sur l'infrastructure et ceux basés sur les clients. La Figure 1.4 illustre le cas le plus général d'un WMN hybride. Dans ce type d'architecture les clients mesh intègrent les fonctionnalités de routage au même niveau que les routeurs mesh. Ainsi un client mesh peut accéder à la dorsale même s'il se retrouve hors de la couverture radio des routeurs mesh et aussi hors de la couverture radio des stations de bases disponibles au niveau de son réseau. En effet, un client mesh voulant transmettre des données à destination de la dorsale peut se baser sur les fonctionnalités de routage des autres clients pour router ses données vers le point d'accès de son réseau ou vers un routeurs mesh et ainsi atteindre la dorsale (voir Figure 1.4 ). Par conséquent, la couverture radio et la fiabilité de la dorsale sont considérablement améliorées. Les WMNs hybrides représentent le cas le plus général et le plus utilisé.

## 1.2 Pourquoi des réseaux sans fil maillés ?

Le concept des réseaux sans fil maillés est reconnu comme une solution prometteuse pour améliorer les performances des infrastructures de communication afin de supporter plusieurs types d'applications. Les WMNs peuvent aussi donner naissance à de nouvelles applications qui étaient jusque là impossibles avec les solutions traditionnelles. La force

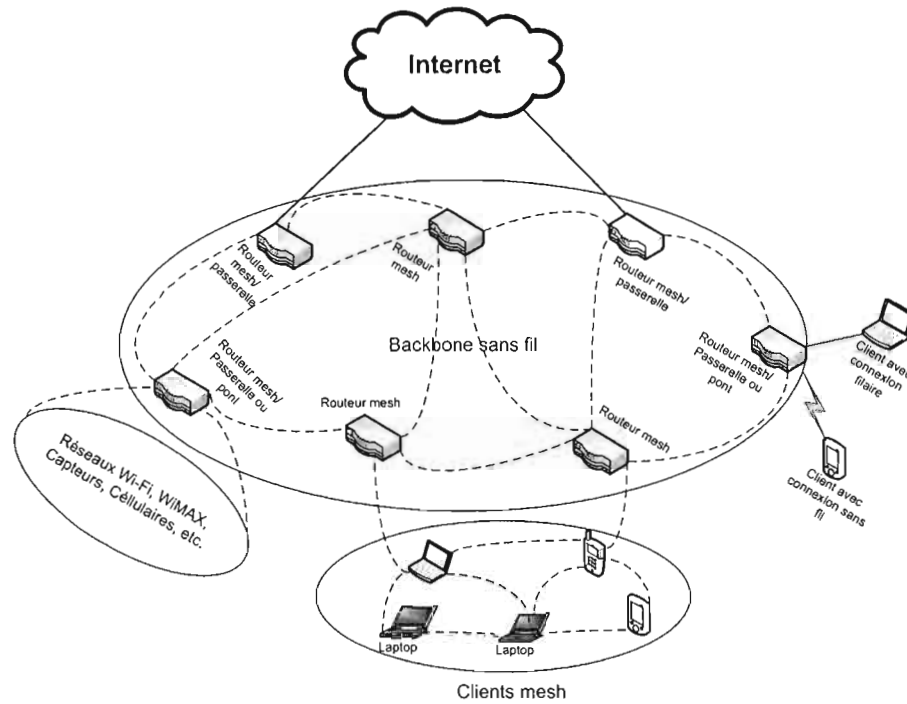


FIG. 1.4: Les WMNs hybrides

des WMNs est le résultat direct de leurs caractéristiques qui sont les suivantes :

1. **Des coûts d'installation réduits** : La connexion sans fil est généralement assurée par le déploiement de points d'accès Wi-Fi. Ces derniers sont traditionnellement reliés à la dorsale par des liaisons Ethernet. Au fur et à mesure que le nombre de clients à servir augmente ou bien que la zone à couvrir devient plus large, d'autres points d'accès doivent être déployés. L'installation de ces nouveaux point d'accès est coûteuse vu qu'il faut assurer une liaison filaire entre chaque point d'accès et la dorsale. Les WMNs simplifient, rendent plus flexible et diminuent le coût d'installation et de maintenance. En effet, un nombre réduit de routeurs mesh est reliés à la dorsale par des liaisons filaires. Ces routeurs sont ceux qui intègrent les fonctionnalités de passerelle réseau. En outre, un routeur mesh coûte beaucoup moins cher qu'un point d'accès. Par conséquent, l'installation, la modification et la maintenance des WMNs est nettement moins coûteuse comparativement aux réseaux sans fil traditionnels.

**2. Une fiabilité améliorée :** Dans les réseaux sans fil, les interférences causent des problèmes de transmissions au niveau des liaisons et aussi au niveau des points d'accès. En effet, une liaison sans fil entre un client et une station de base peut ne pas transmettre correctement les données si elle subit une interférence importante. De plus, une station de base qui se trouve dans un environnement hautement perturbé par l'interférence, ne peut pas servir correctement ses clients. Ces problèmes engendrent un nombre important de retransmissions et par conséquent conduisent à la congestion du réseau. L'adoption de la communication multi-saut dans les réseaux sans fil maillés permet l'existence de plusieurs chemins alternatifs pour une transmission. Ainsi, les chemins souffrant de l'interférence sont évités. En plus, les chemins alternatifs sont utilisés aussi pour passer outre les liaisons congestionnées. Nous concluons ainsi que les WMNs offrent des mécanismes contre l'interférence et la congestion afin de préserver la stabilité de l'infrastructure de communication.

**3. Une couverture radio plus large :** Les réseaux sans fil actuels basés sur les standards IEEE 802.11a et IEEE 802.11g offrent aux stations de base la possibilité d'émettre à des débits élevés, par ex., 54Mbps. Ces débits, rendent les signaux transmis plus sensibles au phénomène de l'affaiblissement de propagation du signal (path loss). Par conséquent, les stations de base couvrent des zones moins larges. Dans ces conditions, une station de base voulant transmettre à des clients éloignés doit dépenser plus d'énergie pour émettre un signal avec une assez grande puissance. Avec les WMNs, les routeurs mesh ont une couverture radio beaucoup plus importante que les stations de base traditionnelles même en utilisant des débits élevés. En effet, en exploitant la communication multi-saut, chaque routeur mesh appartenant à la dorsale sans fil du réseau peut transférer ses données en se servant des autres routeurs mesh, ainsi les données sont envoyées de proche en proche jusqu'à atteindre la destination. Donc, un routeur mesh dépense juste l'énergie suffisante pour faire parvenir le signal au prochain routeur (un voisin). Par conséquent, la portée radio d'un routeur mesh est équivalente à la portée radio de tout la dorsale sans fil du réseau.

### 1.3 Applications des réseaux sans fil maillés

Dans ce qui suit, nous décrivons les applications des réseaux WMNs les plus fréquemment citées dans la littérature.

**L'accès à Internet :** Les fournisseurs d'accès à Internet (ISP) s'intéressent de plus en plus aux WMNs pour offrir l'accès sans fil à large bande dans les zones urbaines et même dans les régions éloignées et rurales. En effet les avantages offerts par les WMNs comme la facilité d'installation et la réduction des coûts de déploiement, d'exploitation et de maintenance font de ces réseaux un choix idéal pour les fournisseurs d'accès à Internet. **Aiirmesh Communications Inc** (Aiirmesh communications, 2009) est une société qui offre un service d'accès à Internet en utilisant comme infrastructure des réseaux sans fil maillés basés sur différents standards de communication sans fil. Elle offre le service d'accès sans fil à large bande pour les entreprises, les résidents et dans les endroits publics.

**La sûreté publique (Public safety) :** Les WMNs sont considérés comme une solution prometteuse pour les services publics comme la police, les pompiers et les différents services d'urgences médicales et de secours. En effet, afin d'augmenter l'efficacité des interventions qui ne cessent d'augmenter en nombre, ces services ont commencé à munir leurs employés sur le terrain d'ordinateurs portables, de PDAs (Personal Digital Assistant) et des caméras de surveillance mobiles. Actuellement, plusieurs de ces services utilisent des WMNs comme infrastructure de communication fiable entre les appareils mobiles des travailleurs dépêchés sur le terrain et les postes de commande afin d'organiser et de synchroniser les différentes étapes de l'intervention (Hossain et Leung, 2008).

**L'automatisation dans le bâtiment (Buildings Automation) :** Actuellement, de plus en plus d'équipements dans les bâtiments offrent la possibilité de commande à distance. Ainsi, la température, l'éclairage, la climatisation et d'autres paramètres peuvent être surveillés et régulés à distance. Traditionnellement, l'infrastructure de communication déployée pour effectuer ce contrôle est un réseau filaire qui assure la liaison entre le poste de commande et les différents équipements. Ce réseau doit offrir un débit as-

sez élevé. Cette solution s'avère relativement chère en termes de coûts d'installation et d'exploitation. Les WMNs constituent une alternative beaucoup moins coûteuse pour ce genre d'application. En effet, en déployant plusieurs routeurs mesh entre le poste de commande et les équipements à contrôler, l'installation et la maintenance de l'infrastructure de communication est beaucoup moins coûteuse. En outre, la solution basée sur les WMNs est plus flexible car elle permet d'augmenter le débit des transmissions entre le poste de commande et les équipements juste en ajoutant des routeurs mesh, donc sans introduire des modifications majeures.

**L'accès sans fil large bande à domicile (broadband home networking) :** Plusieurs équipements d'utilisation quotidienne dans les foyers sont présentement capables de s'échanger des données et même de se connecter à Internet pour se mettre à jour ou bien pour offrir plus de fonctionnalités à l'utilisateur. La plupart des infrastructures de communication pour ce genre d'applications sont basées sur des réseaux IEEE 802.11 WLAN (réseaux locaux sans fil). Cette solution a les inconvénients suivants :

1. Des zones mortes qui ne sont pas couvertes par les points d'accès peuvent exister même dans des foyers qui sont assez petits. La solution la plus directe pour ce problème est le déploiement de points d'accès additionnels. En dépit de sa simplicité, nous avons montré dans la section 1.2 que le déploiement de nouveaux points d'accès est très coûteux surtout pour des applications à l'échelle d'un domicile.
2. Les communications entre les équipements servis par des points d'accès différents doivent passer impérativement par le modem d'accès. Par conséquent, ce dernier doit supporter un grand nombre de transmissions et peut devenir rapidement un goulot d'étranglement. Ainsi, ce modèle de communication est peu flexible et pas très efficace. Dans les cas extrêmes, le modem devient tellement surchargé et congestionné qu'il ne peut plus assurer la communication entre les équipements, ni l'accès à Internet.

L'introduction des réseaux sans fil maillés comme infrastructure de communication pour ce type d'application comme le montre la Figure 1.5 permet de résoudre les deux problèmes cités ci-dessus. En effet, en installant des routeurs mesh à la place des points



d'accès, nous obtenons les améliorations suivantes :

1. Les zones mortes sont supprimées en ajoutant des routeurs mesh qui coûtent moins cher que les points d'accès. En outre, les routeurs mesh sont plus facile à installer car ils ne requièrent pas le déploiement des liaisons filaires jusqu'au modem. Même si après l'ajout des routeurs mesh, des zones mortes subsistent, nous pouvons simplement changer l'emplacement des routeurs mesh dépendamment des zones que nous voulons couvrir.
2. Les routeurs mesh permettent aux équipements connectés à différents points d'accès de communiquer directement sans avoir à passer par le modem d'accès au à la dorsale. Par conséquent, la charge est grandement diminuée sur le modem qui est généralement le goulot d'étranglement dans ce type d'application.

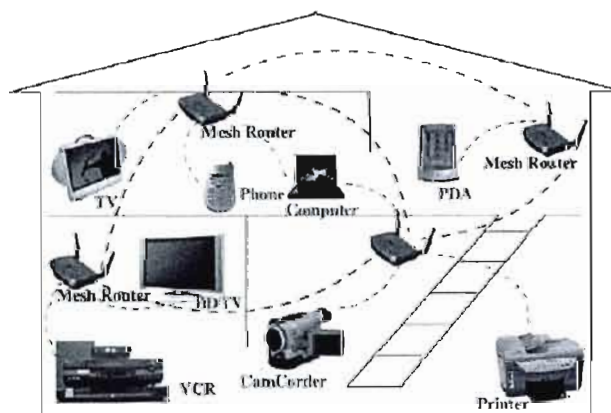


FIG. 1.5: Les WMNs dans l'accès à large bande au domicile (Akyildiz *et al.*, 2005)

**Les réseaux d'entreprises :** Le cas le plus général pour ce genre d'application est une entreprise composée de plusieurs bâtiments. L'objectif ici est d'offrir une infrastructure de communication permettant au personnel de l'entreprise d'échanger des données au sein du même bâtiment et aussi entre les différents bâtiments de l'entreprise. La solution la plus utilisée actuellement pour atteindre cet objectif est le déploiement d'un réseau sans fil basé sur le standard IEEE 802.11 dans chaque bâtiment. Les liaisons entre les bâtiments sont réalisées par un câblage Ethernet. Procéder ainsi n'est parfois pas

souhaitable pour les raisons suivantes :

1. Les liaisons Ethernet entre les bâtiments coûtent très cher aux entreprises.
2. Cette solution n'est pas flexible. En effet, avec l'évolution de l'entreprise, la quantité de données échangées entre les bâtiments augmente. Afin d'assurer la fluidité des échanges, le câblage Ethernet entre les bâtiments doit être modifié pour supporter le nouveau flux de données. Il est à noter que la modification du câblage Ethernet est la seule solution dans ce cas, car même en ajoutant des points d'accès, ceci ne va augmenter la capacité que localement dans chaque bâtiment.

Les deux inconvénients cités ci-dessous peuvent être supprimés en remplaçant les points d'accès par des routeurs mesh (quand l'environnement permet une bonne couverture radio) comme illustré dans la Figure 1.6 afin d'introduire les WMNs. Ces derniers apportent les changements suivants :

1. Les connexions Ethernet filaires entre les différents bâtiments peuvent être simplement supprimées. Les échanges entre les bâtiments se font directement via les routeurs mesh.
2. Au fur et à mesure que la quantité de données transférées entre les différents bâtiments augmente, des nouveaux routeurs mesh peuvent être rajoutés et partagés entre le personnel dans chaque bâtiment. Ainsi, la mise à l'échelle du réseau est facile, rapide et beaucoup moins cher comparativement à la solution basée sur des connexions Ethernet entre les bâtiments de l'entreprise.

Les WMNs peuvent être déployés dans plusieurs autres domaines d'importance majeure, par ex., les hopitaux, les systèmes de transport, les systèmes de surveillance (Akyildiz *et al.*, 2005) afin d'améliorer la fiabilité, la robustesse et la mise à l'échelle des applications et réduire les coûts d'installation, d'exploitation et de maintenance des infrastructures de communication.

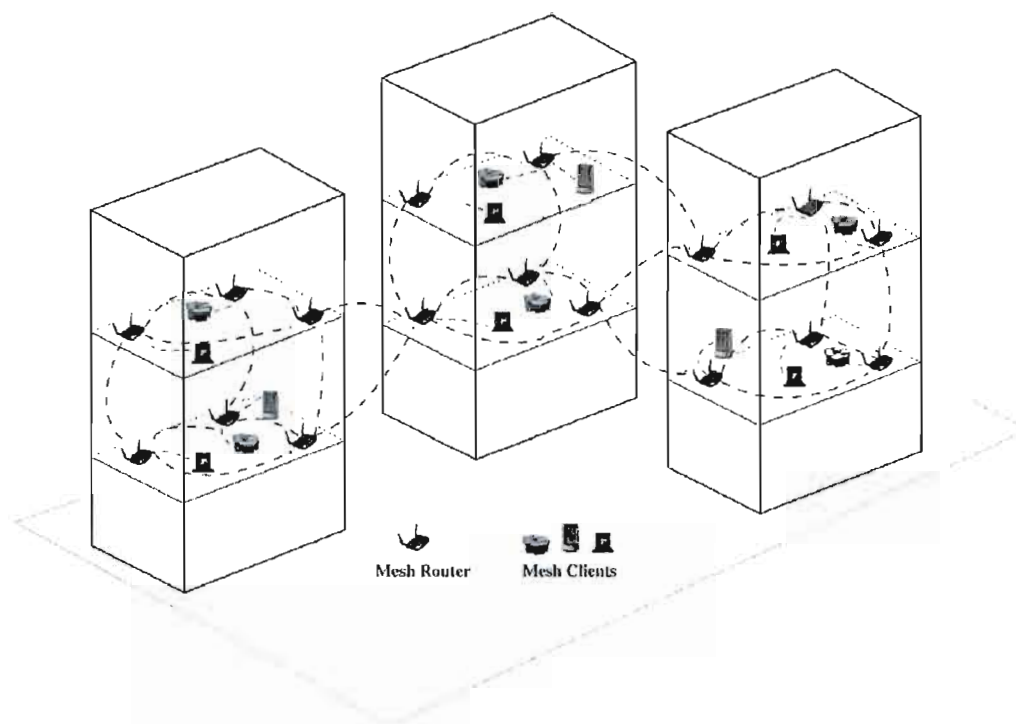


FIG. 1.6: Les WMNs dans les réseaux d'entreprises (Akyildiz *et al.*, 2005)

#### 1.4 Les réseaux sans fil maillés et les standards IEEE

1. **Le standard IEEE 802.11s** : il définit les protocoles au niveau de la couche MAC pour les réseaux sans fil locaux IEEE 802.11 (IEEE 802.11 Task Group, 2007) basés sur la technologie mesh. Dans la suite et à des fins de présentation, nous dénotons ce type de réseau par WLAN maillé. À la différence des autres réseaux basés sur le protocole IEEE 802.11, dans un WLAN maillé, les équipements peuvent communiquer directement entre eux sans impérativement passer par la station de base. Ainsi, un WLAN maillé est une solution hybride qui combine les avantages des réseaux ad hoc et les réseaux Wi-Fi traditionnels. Avant la naissance du groupe de travail sur le standard IEEE 802.11s (IEEE 802.11 Task Group s, 2009), plusieurs protocoles de communication pour les WLAN maillés ont été développés. Cependant, ces protocoles étaient tous propriétaires et ne permettaient pas l'interconnexion entre les WLAN maillés utilisant des protocoles différents. Le groupe de travail TG

'S' (Task Group 'S') responsable du développement du standard IEEE 802.11s tente de régler ce problème d'interconnexion en standardisant les protocoles de la couche MAC pour les WLAN maillés. Au niveau de la couche physique, les standards IEEE 802.11 a/b/g et n peuvent être utilisés. Une fois finalisé, le standard IEEE 802.11s permettra aux utilisateurs du WI-FI (domicile et entreprise) de profiter pleinement des débits offerts par le standard IEEE 802.11n (les systèmes MIMO) en éliminant la connexion filaire Ethernet et en la remplaçant par une dorsale sans fil. En outre, IEEE 802.11s permettra une nette amélioration en termes de couverture radio comparativement aux WLAN traditionnels. Selon (Wang et Lim, 2008), la dernière version provisoire non encore approuvée (version 1.02) de l'amendement IEEE 802.11s présente encore plusieurs lacunes au niveau de la couche MAC qu'il faut régler dans les prochaines versions avant de lancer des produits commerciaux.

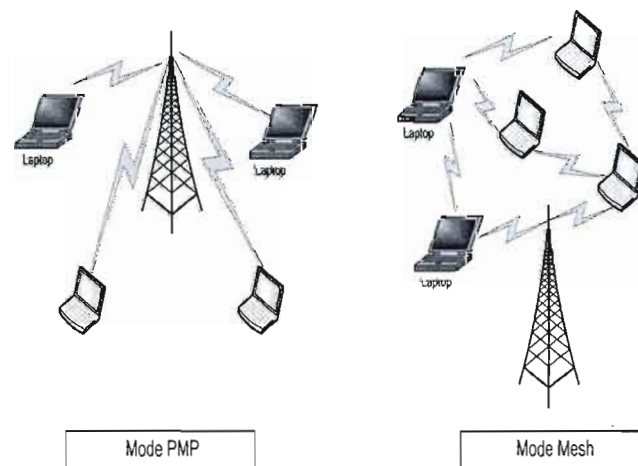


FIG. 1.7: Le mode de communication PMP et le mode de communication maillé

2. **Le standard IEEE 802.15.5** : c'est un standard qui a pour objectif l'introduction de la technologie mesh au niveau des réseaux sans fil personnels (WPAN) (IEEE 802.15.5 WPAN, 2009). Ces derniers sont généralement composés d'équipements personnels (Téléphones portables, PDAs, ordinateurs portables, appareils photos numériques, etc). Ces équipements utilisent le Bluetooth (Bray et F Sturman, 2000) comme technologie de communication qui permet l'échange des données pour une dizaine de mètres. Le groupe de travail sur le standard IEEE 802.15.5 vise à définir

et à développer les mécanismes qui doivent être présents au niveau des couches physique et MAC pour pouvoir mettre en œuvre la technologie mesh dans les WPANs. Le standard IEEE 802.15.5 donnera naissance à des réseaux sans fil personnels qui offrent des débits plus importants et garantissent des transmissions à des distances plus longues. En outre, les WPANs basés sur la technologie mesh vont économiser la consommation des batteries des équipements comparativement aux WPANs traditionnels en minimisant les retransmissions. Ainsi, le réseau est plus fiable et dispose d'une durée de vie plus longue.

3. **Le standard IEEE 802.16a** : Le standard de base IEEE 802.16 visait à résoudre le problème de l'accès sans fil à large bande dans les réseaux sans fil métropolitains. Il opère dans la bande de fréquence de 10 à 60 GHz et utilise une architecture point à multipoint (PMP). Dans cette dernière, une station de base (BS) sert plusieurs clients. Dans la bande de fréquence de 10 à 60 GHz, les communications entre la station de base et les clients doivent se faire à vue directe (Line-Of-Sight propagation), c.-à-d. que l'existence d'un obstacle entre la station de base et le client conduit automatiquement à la perte de la communication. Par conséquent, ce mode de communication est difficile à mettre en œuvre dans les zones urbaines. Le standard IEEE 802.16a (IEEE 802.16 Task Group a, 2003) a été introduit pour opérer dans des fréquences plus basses (2 à 11 GHz). Cette plage de fréquence ne requiert pas l'acquisition d'une licence pour l'exploiter et peut fonctionner même avec la présence d'obstacles entre la station de base et le client (Non Line-Of-Sight propagation). L'IEEE 802.16a définit aussi un mode de communication maillé en plus du mode PMP. Ce nouveau mode permet des communications multi-saut entre les clients sans passer obligatoirement par la station de base. Ainsi, cette dernière couvre une zone beaucoup plus grande comparativement au mode PMP. La Figure 1.7 illustre les modes PMP et le mode de communication maillé. Le standard IEEE 802.16a a été ratifié le 29 janvier 2003 et a été publié le 1 avril de la même année.

## CHAPITRE II

### LES SYSTÈMES MIMO

Dans la quête incessante pour l'augmentation de la capacité des réseaux sans fil, les recherches ont montré que les systèmes à antennes multiples appelés communément MIMO (Multiple Input Multiple Out) constituent une solution très efficace. Des recherches avant-gardistes sur les systèmes MIMO ont été faites aux laboratoires de Bell Labs. Ces recherches ont conduit à la publication de plusieurs articles (Telatar, 1999), (Foschini, 1996) et (Foschini et Gans, 1998) qui ont ouvert les portes pour plusieurs champs de recherches qui essaient tous d'exploiter les caractéristiques des système MIMO dans le but d'améliorer les techniques de transmissions sans fil en termes de débit et de fiabilité. Dans un système de transmission MIMO, plusieurs antennes sont installés au niveau de l'émetteur ou du récepteur, ainsi les MIMO introduisent une dimension spatiale qui s'ajoute à la dimension temporelle jusque là utilisée dans le traitement des signaux numérique (Gesbert *et al.*, 2003). Cette nouvelle dimension spatiale permet de tirer avantage de l'évanouissement et du multi-trajets considérés habituellement comme des problèmes de transmission. En effet, le phénomène de l'évanouissement est exploité dans les MIMO afin d'améliorer le débit et diminuer le taux d'erreur sur les bits transmis (Bit Error Rate)(Gesbert *et al.*, 2003). Dans ce chapitre, nous allons détailler le fonctionnement des MIMO et exposer les améliorations qu'ils apportent aux systèmes de transmissions sans fil. Nous nous intéressons particulièrement à l'étude de la capacité de Shanon des systèmes MIMO. Nous étudions aussi les gains potentiels offerts par l'introduction des systèmes MIMO au niveau de la couche physique des réseaux sans fil maillés présentés dans le chapitre précédent avec les systèmes MIMO. À la fin du chapitre, nous détaillons les standards de communications sans fil développés autour des systèmes MIMO.

## 2.1 Capacité des systèmes MIMO

La capacité d'un système de communication sans fil est le débit maximal que ce système peut atteindre pour transmettre les données avec une probabilité d'erreur faible sur les transmissions (Goldsmith, 2005)(Duman et Ghayeb, 2007). La notion de capacité est utilisée souvent pour évaluer les performances théoriques d'un système de communication sans prendre en considération les limitations liées à la complexité des algorithmes qu'il faut mettre en oeuvre pour atteindre ces performances. Le calcul de la capacité d'un système de communication sans fil est basé sur le fameux théorème de Claude Shanon développé en 1940. Ce dernier a réussi à trouver la relation mathématique qui permet le calcul de la capacité d'un canal indépendamment du codage et de la modulation utilisés. Foschini dans (Foschini et Gans, 1998) a donné une idée sur la limite supérieure en terme de capacité qu'un canal sans fil peut atteindre lors de l'utilisation de plusieurs antennes. L'objectif de cette section est de montrer que la capacité d'un système de communication est grandement améliorée lors du déploiement de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur comparativement aux systèmes qui utilisent une seule antenne au niveau de l'émetteur et du récepteur appelés communément SISO.

### 2.1.1 Capacité de Shanon d'un lien SISO

#### 2.1.1.1 Capacité de Shanon d'un lien SISO avec un canal AWGN

Dans un lien SISO, l'émetteur et le récepteur sont équipés chacun d'une seule antenne. Nous prenons le cas d'un canal AWGN où le signal est perturbé uniquement par le bruit blanc gaussien additif. La relation entre le signal  $x$  envoyé par l'émetteur et le signal  $y$  reçu par le récepteur est la suivante :

$$y = \sqrt{\rho}x + w \quad (2.1)$$



dans l'équation ci-dessus, le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur est représenté par  $\rho = P/\sigma^2$  avec  $P$ , la puissance de transmission du signal disponible au niveau de l'émetteur,  $w$  est une variable qui suit une loi gaussienne de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$  représentant le bruit blanc additif. Il est à noter que dans ce chapitre et dans la suite du document, nous considérons un canal avec une bande passante de 1 Hz.

La capacité du canal est donnée selon (Shannon, 1960) par l'équation suivante :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad \text{bits/seconde} \quad (2.2)$$

#### 2.1.1.2 Capacité de shanon d'un lien SISO avec canal à évanouissement

Nous considérons maintenant un cas plus pratique où le signal transmis est non seulement exposé au bruit additif mais aussi au phénomène d'évanouissement du canal . La figure 2.1 illustre un système de communication SISO avec canal à évanouissement. L'évanouissement est la variation de l'atténuation du signal avec le temps et la distance. Il est généralement causé par les effets du multi-trajets et de l'ombrage (Shadowing) et il varie avec le temps, la position géographique de l'émetteur et du récepteur et la fréquence du signal. L'évanouissement est divisé en plusieurs types selon le domaine temporel et le domaine fréquentiel. En ce qui concerne le domaine temporel, nous distinguons l'évanouissement rapide et l'évanouissement long dépendamment de la fréquence du changement des coefficients du canal. Un symbole désigne une valeur possible de la constellation de la modulation utilisée (par exemple, en BPSK, on a deux symboles possibles +1 et -1) et la durée d'un symbole est la durée nécessaire pour transmettre un symbole. En effet, dans l'évanouissement rapide, les coefficients du canal peuvent changer plusieurs fois pendant la durée d'un symbole alors que dans l'évanouissement long, le rythme de variation des coefficients du canal est beaucoup moins rapide que la durée des symboles. Nous distinguons aussi deux types d'évanouissement au niveau du domaine fréquentiel. L'évanouissement sélectif en fréquences et l'évanouissement plat selon la manière dont les coefficients d'évanouissement du canal agissent sur les différentes compo-



santes fréquentielles du signal. Précisément, dans l'évanouissement sélectif en fréquences, les différentes composantes fréquentielles du signal sont soumises à des coefficients d'évanouissements différents et indépendants alors que dans l'évanouissement plat, toutes les composantes fréquentielles du signal subissent le même niveau d'évanouissement. Dans la suite de ce document, nous considérons un évanouissement plat et rapide. Le choix d'un évanouissement plat est dans un but de simplification alors que l'évanouissement rapide nous permettra d'avoir un nombre importants de réalisations du canal (changement des coefficients d'évanouissement du canal) et ainsi calculer une capacité moyenne.

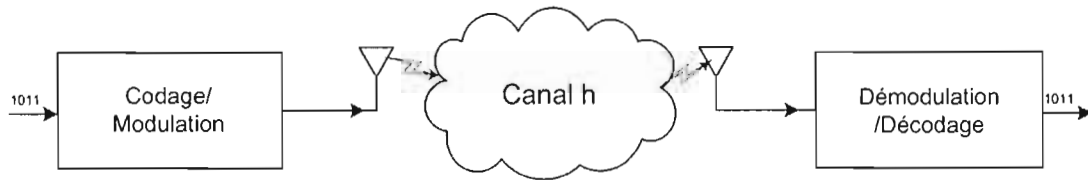


FIG. 2.1: Système de communication SISO avec canal à évanouissement

La relation entre le signal émis  $x$  et le signal reçu  $y$  pour un lien SISO avec un canal à évanouissement est la suivante :

$$y = \sqrt{P}hx + w \quad (2.3)$$

où  $h$  est une variable complexe gaussienne de moyenne nulle qui représente le coefficient d'évanouissement du canal entre l'émetteur et le récepteur.

La capacité de Shanon dans ce cas est donnée dans (Gesbert *et al.*, 2003) par l'équation suivante :

$$C = \log_2(1 + \rho|h^2|) \quad \text{bits/seconde} \quad (2.4)$$

où  $|h^2|$  représente le gain du canal.

### 2.1.2 Capacité de Shanon d'un lien MIMO

À la différence d'un lien SISO où chacun des deux bouts de la communication est équipé d'une seule antenne, dans un lien MIMO l'émetteur ou le récepteur est équipé de plusieurs antennes. La figure 2.2 illustre un système de communication MIMO. Un tel système peut être représenté par le modèle suivant :

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (2.5)$$

où  $\mathbf{H}$  représente la matrice des coefficients d'évanouissement entre les différentes antennes émettrices et réceptrices. Afin de bien comprendre le modèle ci-dessus, nous pouvons l'écrire de façon plus détaillée comme suit :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \sqrt{\rho} \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r 1} & \cdots & h_{M_r M_t} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{M_r} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

avec  $\mathbf{x} = [x_1 \cdots x_j]^T$  ( $j = 1 \cdots M_t$ ) ( $(.)^T$  est utilisé ici pour désigner l'opérateur transposé d'un vecteur) un vecteur de dimension  $M_t$  où chaque élément  $x_j$  représente le symbole émis de la  $j^{\text{ième}}$  antenne de l'émetteur,  $\mathbf{y} = [y_1 \cdots y_i]^T$  ( $i = 1 \cdots M_r$ ) est un vecteur de dimension de  $M_r$  où chaque élément  $y_i$  est le symbole reçu par la  $i^{\text{ième}}$  antenne du récepteur,  $\mathbf{H} = [h_{ij}]$  ( $i = 1 \cdots M_r$  et  $j = 1 \cdots M_t$ ) est une matrice de dimension  $M_r \times M_t$  où chaque élément  $h_{ij}$  représente le coefficient d'évanouissement du canal entre la  $j^{\text{ième}}$  antenne émettrice et la  $i^{\text{ième}}$  antenne réceptrice et  $\mathbf{w} = [w_1, \cdots, w_i]^T$  ( $i = 1 \cdots M_r$ ) le vecteur de dimension  $M_r$  représentant le bruit blanc de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .

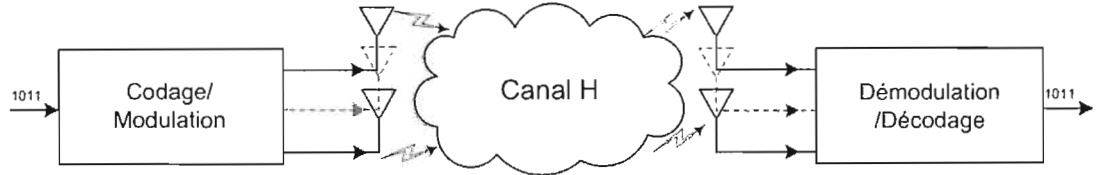


FIG. 2.2: Système de communication MIMO

### 2.1.2.1 La décomposition du canal avec SVD

Dans un système MIMO où les coefficients d'évanouissement entre les différentes antennes émettrices et réceptrices sont indépendants, une caractéristique très importante appelée multiplexage spatial (Spatial Multiplexing) peut être mise en valeur. Le multiplexage spatial dans un canal MIMO exploite la non corrélation des coefficients d'évanouissement sur les différents chemins entre la source et la destination pour diviser le canal original en  $R_h$  sous-canaux parallèles (nous allons voir par la suite la définition du  $R_h$ ). En multiplexant les signaux sur ces différents sous-canaux parallèles, le débit de la transmission entre l'émetteur et le récepteur est amélioré de l'ordre de  $R_h$  comparativement à un système SISO. Cette augmentation en termes de débit est communément appelée gain en multiplexage (Multiplexing gain).

Nous décomposons le canal  $\mathbf{H}$  entre l'émetteur et le récepteur en ses valeurs singulières en utilisant la méthode SVD (Singular Value Decomposition). Ainsi la matrice  $\mathbf{H}$  peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (2.7)$$

où  $\mathbf{U}$  est une matrice unitaire de dimension  $M_r \times M_r$  (c.-à-d.  $\mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}_{M_r}$ ),  $\mathbf{V}$  est une matrice unitaire de dimension  $M_t \times M_t$  (c.-à-d.  $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{I}_{M_t}$ ),  $(\cdot)^H$  est utilisé ici pour désigner l'opérateur conjugué transposé d'une matrice.  $\mathbf{\Sigma}$  est une matrice diagonale de dimension  $M_r \times M_t$  dont les éléments diagonaux  $\Sigma(i, i)$  représentent les valeurs singulières de la matrice  $\mathbf{H}$ .  $R_h$  de ces valeurs singulières sont non nulles, où  $R_h$  est le rang de la matrice  $\mathbf{H}$ . Il est à noter que le rang de la matrice  $\mathbf{H}$  est toujours inférieur au minimum de  $M_t$  et  $M_r$ , c.-à-d.  $R_h \leq \min(M_t, M_r)$ .

La décomposition du canal est réalisée en appliquant une transformation sur le signal à émettre  $\mathbf{x}$  et sur le signal à recevoir  $\mathbf{y}$ . En effet, au niveau de l'émetteur, le signal  $\mathbf{x}$  est généré par une transformation linéaire sur un vecteur  $\tilde{\mathbf{x}}$  tel que  $\mathbf{x} = \mathbf{V}\tilde{\mathbf{x}}$ . Le récepteur

effectue une transformation sur le signal  $\mathbf{y}$  reçu en le multipliant par la matrice unitaire  $\mathbf{U}^H$  tel que  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$ . La Figure 2.3 montre les transformations faites au niveau de l'émetteur et au niveau du récepteur.

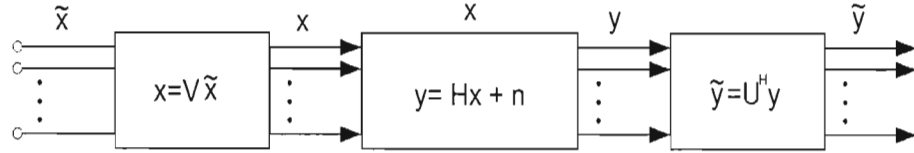


FIG. 2.3: Transformation au niveau de l'émetteur et le récepteur SVD

En remplaçant la matrice  $\mathbf{H}$  par sa décomposition SVD dans l'équation 2.7, nous obtenons l'équation équivalente suivante :

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{U}^H \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (2.8)$$

En appliquant les transformations au niveau de l'émetteur et du récepteur, l'équation 2.8 devient :

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sqrt{\rho} \mathbf{U}^H (\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \mathbf{x} + \mathbf{w}) \quad (2.9)$$

$$= \sqrt{\rho} \mathbf{U}^H (\mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) \quad (2.10)$$

$$= \sqrt{\rho} \mathbf{U}^H \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{U}^H \mathbf{w} \quad (2.11)$$

$$= \sqrt{\rho} \mathbf{\Sigma} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \quad (2.12)$$

Il est à rappeler que  $\mathbf{x} = \mathbf{V} \tilde{\mathbf{x}}$ ,  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$  et  $\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{w} \mathbf{V}$ . Comme les matrices  $\mathbf{U}$  et  $\mathbf{V}$  sont des matrices inversibles donc connaître  $\tilde{\mathbf{x}}$  et  $\tilde{\mathbf{y}}$  est équivalent à connaître  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{y}$ . Il est à noter aussi que la distribution de  $\tilde{\mathbf{w}}$  est la même que celle de  $\mathbf{w}$  car  $\mathbf{V}$  est une matrice unitaire. L'équation 2.12 est équivalente à la série d'équations suivantes :

$$\tilde{y}_1 = \sqrt{\rho}\delta_1\tilde{x}_1 + \tilde{w}_1 \quad (2.13)$$

$$\tilde{y}_2 = \sqrt{\rho}\delta_2\tilde{x}_2 + \tilde{w}_2 \quad (2.14)$$

$$\vdots$$

$$\tilde{y}_{R_h} = \sqrt{\rho}\delta_{R_h}\tilde{x}_{R_h} + \tilde{w}_{R_h} \quad (2.15)$$

$$\tilde{y}_{R_h+1} = \tilde{w}_{R_h+1} \quad (2.16)$$

$$\vdots$$

$$\tilde{y}_{M_t} = \tilde{w}_{M_t} \quad (2.17)$$

La série d'équations ci-dessus montre que le canal original est décomposé en  $R_H$  sous-canaux parallèles où le  $i^{\text{ème}}$  canal a  $\tilde{x}_i$  comme symbole en entrée,  $\tilde{y}_i$  comme symbole reçu,  $\tilde{w}_i$  comme bruit additif et  $\delta_i$  comme gain du canal. Ici  $\delta_i$  ( $i = 1 \dots R_h$ ) représente les valeurs singulières de la matrice  $\Sigma$  c.-à-d.  $\delta_i = \Sigma(i, i)$ . La Figure 2.4 montre les différents paramètres pour chacun des sous-canaux parallèles. Ces derniers sont indépendants c.-à-d. qu'ils n'interferent pas et sont reliés seulement par la contrainte de la puissance totale disponible au niveau de l'émetteur. Cette puissance doit être partagé efficacement sur les différents sous-canaux.

#### 2.1.2.2 Capacité de Shanon d'un lien MIMO avec état du canal connu pour l'émetteur

La capacité de Shanon qu'un lien MIMO peut atteindre dépend de l'information sur l'état du canal disponible au niveau de l'émetteur et au niveau du récepteur c.-à-d. la connaissance des coefficients d'évanouissement du canal par l'émetteur et le récepteur. En effet, plusieurs hypothèses peuvent être faites sur le côté de la communication connaissant l'état du canal. Généralement, le récepteur sur un lien MIMO est supposé connaître l'état du canal car il peut facilement estimer les coefficients d'évanouissement du canal en échangeant une séquence pilote avec l'émetteur préalablement au début de la communica-

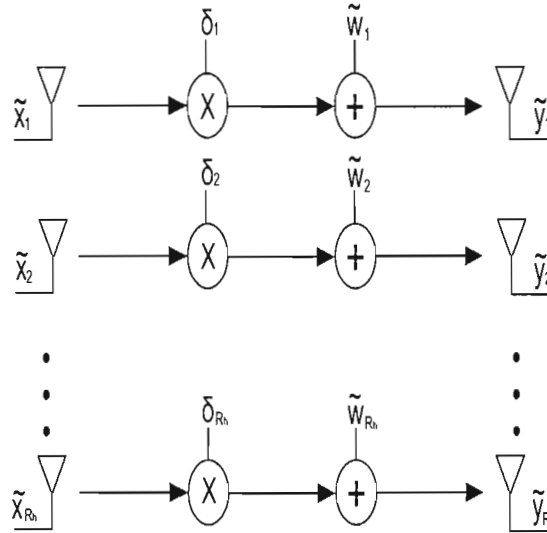


FIG. 2.4: Les sous-canaux parallèles résultant de la décomposition SVD

tion. Dans le cas où un chemin de rétroaction (feedback path) existe entre l'émetteur et le récepteur, ce dernier peut alors renvoyer les coefficients vers l'émetteur. Dans ce cas, nous considérons que l'émetteur et le récepteur connaissent l'état du canal. Plus d'informations sur les techniques d'estimation du canal sont disponibles dans (Goldsmith, 2005).

Idéalement pour un système de transmission MIMO, les coefficients d'évanouissement sont disponibles au niveau de l'émetteur et du récepteur. Dans ce cas, la capacité d'un lien MIMO est égale à la somme des capacités réalisées par les sous-canaux parallèles résultants de la décomposition SVD. Il est à rappeler que les sous-canaux parallèles sont reliés par la puissance totale disponible au niveau de l'émetteur. Par conséquent, la capacité est atteinte en optimisant la distribution de cette puissance sur les différents sous-canaux. Plusieurs méthodes existent à cette fin par ex., Water Fillig, Beamforming, Equal Transmit Power Allocation. Cette dernière méthode est généralement utilisée quand l'émetteur n'a pas accès aux coefficients du canal. L'émetteur dans ce cas ne peut pas optimiser la distribution de la puissance disponible et par conséquent, il la partage équitablement entre les sous-canaux (Duman et Ghayeb, 2007). Dans le cas où

l'information sur la canal est disponible au niveau de l'émetteur, l'une des deux méthodes à savoir Water Filling ou Beamforming peut être appliquée. Le Beamforming consiste en l'allocation de toute la puissance disponible au canal ayant le plus grand gain (Duman et Ghrayeb, 2007). Le Water Filling applique un algorithme qui partage la puissance totale disponible sur les sous-canaux parallèles dans le but de maximiser la capacité totale atteinte par l'ensemble de ces canaux. Quant aux performances, le Water Filling donne la solution optimale au problème de la distribution de puissance dans le cas où les informations sur le canal sont disponibles au niveau de l'émetteur et du récepteur. Dans ce qui suit nous allons voir en détail le fonctionnement de la technique Water Filling.

### 2.1.2.3 Le Water Filling

L'algorithme du Water Filling permet de calculer la répartition optimale de la puissance disponible au niveau de l'émetteur sur les sous-canaux résultants de la décomposition SVD du canal original et ceci dans le but d'atteindre la capacité maximale. Cette dernière est donnée par l'équation suivante dans le cas où les coefficients d'évanouissement sont connus par l'émetteur et le récepteur :

$$C = \max_{\rho_i: \sum_i \rho_i \leq \rho} \sum_{i=1}^{R_h} \log_2(1 + \delta_i^2 \rho_i) \quad (2.18)$$

où  $\rho_i$  et  $\delta_i$  représente respectivement le rapport signal sur bruit et le gain au niveau du  $i^{\text{ème}}$  canal.

L'équation 2.18 peut s'écrire aussi en termes de la portion de puissance  $P_i$  allouée au sous-canal  $i$  comme suit :

$$C = \max_{P_i: \sum_i P_i \leq P} \sum_{i=1}^{R_h} \log_2 \left( 1 + \delta_i^2 \frac{P_i}{\sigma^2} \right) \quad (2.19)$$

où  $P_i$  est la portion de la puissance totale allouée au  $i^{\text{ème}}$  sous-canal

L'équation ci-dessus montre que la capacité d'un lien MIMO pour lequel les coefficients du canal sont disponibles au niveau de l'émetteur et du récepteur est égale à la somme des capacités atteintes par l'ensemble des sous-canaux parallèles en optimisant la répartition de la puissance disponible sur ces sous-canaux. Le Water Filling est un algorithme itératif qui permet de calculer l'ensemble de  $P_i, i = 1, \dots, R_h$  optimaux. Ce problème d'optimisation a la solution suivante (Duman et Ghrayeb, 2007) :

$$P_i = \left( \mu - \frac{1}{\rho \lambda_i} \right)^+ \quad (2.20)$$

où  $(x)^+ = \max\{x, 0\}$ ,  $\lambda_i = \delta_i^2$  et  $\mu$  est la solution de l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^{R_h} \left( \mu - \frac{1}{\rho \lambda_i} \right)^+ = 1 \quad (2.21)$$

à partir de cette dernière équation nous pouvons déduire la valeur de  $\mu$  comme suit :

$$\mu = \frac{M_t}{R_h - p + 1} \left( 1 + \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^{R_h - p + 1} \frac{1}{\lambda_i} \right) \quad (2.22)$$

où  $p$  est le compteur de l'algorithme.

L'algorithme Water Filling commence par initialiser le compteur  $p$  à 1. À chaque itération l'algorithme calcule la valeur de  $\mu$  en se basant sur l'équation 2.22 et les valeurs  $P_i, i = 1, \dots, R_h - p + 1$  en utilisant la valeur de  $\mu$  calculée et l'équation 2.20. Il procède ensuite à l'élimination de chaque sous-canal  $i$  ayant  $P_i < 0$  en mettant  $P_i = 0$ . Finalement, l'algorithme incrémente  $p$  de un pour la prochaine itération. Au niveau de l'itération suivante, l'algorithme recalcule les  $P_i$  en considérant seulement les canaux qui n'étaient pas éliminés dans les itérations précédentes. L'algorithme continue ainsi jusqu'à ce qu'il arrive à une itération où toutes les puissances calculées sont positives, c.-à-d.  $P_i > 0, \forall i \in \{1 \dots R_h - p + 1\}$ . À ce point, l'ensemble des puissances  $P_i$  calculées dans cette dernière itération représentent la solution optimale au problème de la répartition des puissances. La Figure 2.5 illustre les différentes variables dans une itération de l'algorithme Water



Filling. Cette figure montre aussi l'élimination de deux sous-canaux qui ne vont plus être considérés dans la suite de l'algorithme.

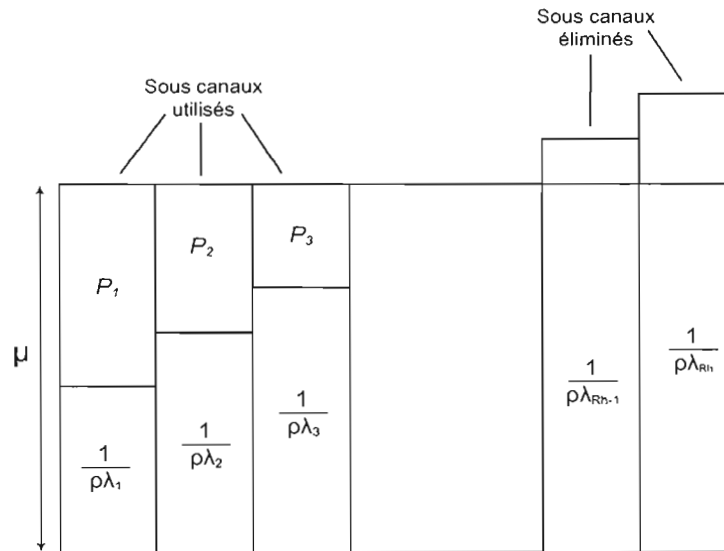


FIG. 2.5: Les variables considérées dans une itération de l'algorithme Water Filling

#### 2.1.2.4 Capacité de shanon d'un lien MIMO avec état du canal non connu pour l'émetteur

Nous supposons maintenant que les coefficients du canal sont disponibles seulement au niveau du récepteur et que l'émetteur n'a pas de connaissance sur l'état du canal. Dans ce cas, l'émetteur ne peut pas optimiser la répartition de la puissance et la meilleure solution est d'utiliser l'Equal Power Allocation afin de distribuer la puissance équitablement entre les sous-canaux. La capacité du lien MIMO dans ces conditions est donnée dans le papier de Telatar (Telatar, 1999) par la relation suivante :

$$C = \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \quad (2.23)$$

où  $\mathbf{I}_{M_r}$  est la matrice identité de dimension  $M_r$ . Dans ce même papier (Telatar, 1999), Telatar a démontré que la capacité d'un lien MIMO augmente linéairement avec  $M =$

$\min(M_t, M_r)$  et ceci même dans le cas où l'émetteur n'a pas accès à l'état du canal. En effet, en utilisant la loi des grands nombres, nous avons :

$$\lim_{M_t \rightarrow \infty} \frac{1}{M_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H = \mathbf{I}_{M_r} \quad (2.24)$$

En remplaçant cette dernière équation dans l'équation 2.23, nous obtenons :

$$C = M_r \log_2(1 + \rho) \quad (2.25)$$

En définissant  $M = \min(M_t, M_r)$ . Lorsque  $M$  prend des grandes valeurs, nous pouvons écrire :  $C = M \log_2(1 + \rho)$ . Cette dernière équation démontre que la capacité du lien MIMO augmente linéairement avec  $M$ . Nous remarquons aussi que la capacité devient indépendante des réalisations du canal  $\mathbf{H}$ . Dans (Moustakas *et al.*, 2003), les auteurs ont prouvé que ce résultat est valable même pour un petit nombre d'antennes, notamment dans le cas où  $M_t = M_r = M$ . En outre, Foschini a démontré dans (Foschini, 1996) que pour des grandes valeurs du rapport signal sur bruit (SNR), la capacité augmente aussi linéairement avec  $M$ , et ceci pour n'importe quelle valeur de  $M_r$  et  $M_t$ . Ces résultats sont très encourageants. En effet, ils démontrent que l'exploitation de la dimension spatiale dans les systèmes MIMO améliore la capacité sans avoir à dépenser plus de puissance d'émission ou de bande passante et ceci même dans le cas où l'émetteur ne connaît pas l'état du canal. Il est à noter que pour les petites valeurs de SNR, la capacité augmente uniquement avec le nombre d'antennes réceptrices et indépendamment du nombre d'antennes émettrices. Au fur et à mesure que la valeur du SNR augmente, le nombre d'antennes émettrice commence à avoir de l'influence sur la capacité. Ceci est justifié par le fait que pour les petites valeurs de SNR, la distribution de la puissance d'émission entre les sous-canaux donne les mêmes performances que lorsque cette puissance est concentrée sur le sous-canal ayant le plus grand gain en utilisant le Beamforming (Telatar, 1999).

## 2.2 Les systèmes MIMO et les réseaux sans fil maillés

Les réseaux sans fil maillés sont généralement utilisés comme dorsale sans fil pour relier des clients appartenant à plusieurs type de réseaux. Les WMNs assurent dans ce cas la communication entre les clients et aussi la connexion des clients à l'Internet. La tâche de la dorsale implique le transfert d'une grande quantité de données. Ce transfert doit se faire tout en respectant les besoins en termes de qualité de service comme le débit et le délai de transmission exigés par les différentes applications des clients. Afin de répondre dans les meilleures conditions aux différents besoins des clients et supporter la charge de données à transmettre, les WMNs doivent exploiter de nouvelles techniques de communication. Les systèmes MIMO avec leurs avantages en termes de débit constituent une solution très intéressante pour les WMNs. En effet, en implémentant les systèmes MIMO au niveau de la couche physique, les performances des réseaux sans fil maillés sont considérablement améliorées. Nous pouvons résumer les avantages offerts par la combinaison des WMNs et les systèmes MIMO dans les points suivants :

1. **L'amélioration de la capacité du réseau** : le déploiement de liens MIMO au niveau d'un réseau WMN améliore les performances de ce dernier en terme de capacité. Nous avons vu dans la section 2.1.2 qu'un lien MIMO peut atteindre une capacité beaucoup plus grande que celle d'un lien SISO. Un WMN peut tirer avantage de cette caractéristique afin d'améliorer la capacité totale du réseau et servir un plus grand nombre de clients notamment dans le cas de la dorsale sans fil où le réseau a la tâche de transmettre une grande quantité de données. Cette amélioration au niveau de la capacité du réseau conduit à l'amélioration de la qualité de service assurée par le réseau aux différents clients.
2. **L'amélioration de la couverture radio du réseau et la réduction de la puissance d'émission** : Actuellement, de plus en plus d'applications requièrent des débits de transmission importants pour fonctionner correctement. Afin d'assurer ces débits sur de longues distances, les routeurs mesh doivent dépenser une

quantité importante d'énergie pour la puissance d'émission. L'introduction de liens MIMO s'avère très avantageuse car elle permet aux nœuds du réseau de transmettre les données à des débits importants sur des longues distances sans dépenser plus d'énergie ou de bande passante.

3. **Meilleures performances en milieu urbain :** La plus grande densité de trafic pour les communications sans fil est concentrée dans les milieux urbains et notamment dans les centre-ville. Ces endroits sont caractérisés par des regroupements de grandes bâtisses qui font que dans la majorité des cas, la source de données ne dispose pas d'une vue directe avec la destination. Par conséquent, les communications souffrent énormément de l'effet non désiré du multi-trajets et les performances globales du réseau vont se dégrader. L'introduction des systèmes MIMO dans ces conditions est très bénéfique. En effet, les systèmes MIMO convertissent le phénomène du multi trajet considéré comme un handicap en un avantage que le réseau peut exploiter pour améliorer sa capacité. Particulièrement, dans les réseaux sans fil maillés, l'utilisation de plusieurs antennes permet d'éliminer les goulots d'étranglement dans les zones urbaines à forte densité.

### 2.3 Les systèmes MIMO dans les standards de communication sans fil

Afin de faciliter l'introduction dans le milieu industriel des systèmes MIMO et assurer l'interopérabilité, plusieurs standards de communication sans fil sont développés ou sont en cours de développement. Ces standards permettent de lancer des produits basés sur la technologie MIMO et ainsi permettre au domaine de la communication sans fil de bénéficier des avantages offerts par ces systèmes. Dans ce qui suit nous décrivons les standards les plus importants.

1. **Le standard IEEE 802.11n :** Le groupe de travail TGn est chargé du développement de cette norme afin d'introduire la technologie MIMO dans les réseaux Wi-Fi. L'IEEE 802.11n (IEEE 802.11 Task Group n, 2008) vise à atteindre des débits théoriques de

270 Mbits/s pour la bande de fréquence de 2,4 GHz et 300 Mbits/s pour la bande de fréquences 5 GHz. Une fois ratifié, le standard IEEE 802.11n constituera une amélioration pour le standard IEEE 802.11a dans la bande 5GHz et les standards IEEE 802.11 b/g dans la bande 2,4 GHz. La dernière version provisoire (802.11n Draft 5.0) constitue déjà une base pour les constructeurs d'équipements. La ratification du standard IEEE 802.11n est prévue pour le mois de janvier 2010.

2. **Le standard IEEE 802.16e** : Ce standard vise à définir les mécanismes à mettre en œuvre au niveau de la couche MAC des réseaux WiMAX (Worldwide Interoperability for microwave Access) afin de bénéficier de la technologie MIMO. Contrairement aux standards IEEE 802.16a et l'IEEE 802.16d qui n'autorise pas la mobilité des clients, L'IEEE 802.16e (IEEE 802.16 Task Group e, 2005) permet des transmissions entre la station de base et des clients se déplaçant à moins de 120 km/h avec un débit allant jusqu'à 30 Mbits/s. Les équipements de l'IEEE 802.16e opèrent dans une bande de fréquence comprise entre 2 et 6 GHz et permettent à un client mobile de passer d'une station à une autre sans perte de connexion (roaming). Au niveau de la couche physique, L'IEEE 802.16e utilise la technique d'accès multiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Ce standard a été publié le 28 février 2006.
3. Le 3GPP (3rd Generation Partnership Project) est une coopération d'organismes de standardisation qui a pour but la production de spécifications techniques pour les réseaux mobiles de la troisième génération. Le 3GPP a déjà développé deux standards basé sur la technologie MIMO à savoir la version 7 (3GPP Release 7) et la version 8 (3GPP Release 8).

## CHAPITRE III

### ALGORITHME D'ORDONNANCEMENT AVEC CONTRAINTES D'ÉQUITÉ POUR LES WMNS

Dans le chapitre précédent nous avons détaillé les avantages qu'une combinaison entre les réseaux sans fil maillés et les systèmes MIMO peut apporter en termes de flexibilité, couverture radio et débit de transmission. Un élément très important dans les réseaux de communications sans fil est l'algorithme d'ordonnancement déployé. En effet un bon algorithme d'ordonnancement qui profite pleinement des avantages offerts par les différentes technologies employées dans un réseau de communication sans fil permet à ce dernier d'atteindre des meilleures performances et de résister au phénomène de l'interférence. Ce dernier est l'obstacle le plus dur à gérer quant à l'amélioration des communications sans fil en termes de débit de transmission. Les réseaux sans fil maillés à base de MIMO ne dérogent pas à cette règle. Ainsi le développement d'un algorithme d'ordonnancement efficace qui met en valeur le potentiel de ce type de réseaux est une nécessité. D'autant plus que les travaux faits dans ce sens là sont très rares malgré les caractéristique prometteuses des réseaux sans fil maillé à base de liens MIMO. Dans ce chapitre, nous présentons un algorithme d'ordonnancement pour les réseaux sans fil maillés à base de liens MIMO. Cet algorithme tire au maximum avantage du multiplexage spatial, qui est une des caractéristiques fondamentales des systèmes MIMO (Gesbert *et al.*, 2003), et aussi de la réutilisation spatiale. Il gère aussi les interférences afin de limiter leurs effets néfastes sur les performances. L'objectif de notre algorithme d'ordonnancement est de maximiser le débit des réseaux sans fil maillés à base de MIMO tout en assurant l'équité entre les nœuds. Dans (Gambiroza *et al.*, 2004), les auteurs ont étudié l'impact de l'équité sur les performances des dorsales d'accès sans fil et ont démontré que les nœuds qui sont loins du point d'accès filaire réalisent des débits plus faibles que les reste des noeuds du réseau si l'algorithme d'ordonnancement ne prend pas en compte le paramètre de l'équité.

### 3.1 Travaux connexes

Dans cette section nous allons présenter une suite de travaux en relation avec le domaine d'ordonnancement dans les réseaux sans fil et qui sont en relation avec notre proposition.

Dans (Bejerano *et al.*, 2004), les auteurs ont développé un algorithme pour garantir l'équité à l'accès au canal radio entre les différents clients dans une dorsale sans fil. L'algorithme associe les clients aux points d'accès disponibles dans le but de distribuer le trafic de données équitablement entre les points d'accès. Traditionnellement, cette association est basée seulement sur la puissance du signal radio entre le point d'accès et le client c.-à-d. un client est relié au point d'accès qui lui permet de recevoir le signal le plus puissant. Les auteurs ont donné la formulation du problème d'association client-point d'accès en prenant en considération la bande passante radio disponible entre les clients et les points d'accès et aussi la capacité des liens déployés entre les points d'accès au niveau de la dorsale sans fil. Le problème formulé montre la grande corrélation entre la distribution du trafic équitablement entre les points d'accès et l'équité entre les clients pour le partage de la bande radio. L'algorithme proposé réalise une distribution de la charge du trafic et une équité entre les clients proche de l'optimale en procédant aux meilleures associations clients-point d'accès.

Les auteurs dans (Jain *et al.*, 2003) ont étudié l'équité entre les différents point d'accès dans une dorsale sans fil. Ils ont commencé par définir un modèle de référence afin de fixer les objectifs à atteindre comme l'équité et la maximisation de la réutilisation spatiale. En se basant sur ce modèle, ils ont développé un algorithme de niveau MAC pour atteindre les objectifs fixés. Finalement, ils ont étudié la relation entre la capacité qu'une dorsale sans fil peut atteindre et la contrainte de l'équité. Ils ont démontré par des simulations que le développement d'algorithmes de la couche MAC qui essaient seulement de maximiser la capacité conduit à une inégalité dans le partage des ressources de la dorsale entre les points d'accès. En effet, les points d'accès qui sont les plus loin du réseau filaire vont être sévèrement désavantagés.

W.Jaafar, W.Ajib et S.Tabban (Jaafar *et al.*, 2007) ont étudié la capacité des réseaux sans fil maillés basés sur des liens MIMO. Deux types de topologies étaient considérées : la topologie chaîne et la topologie grid. Les auteurs ont calculé la capacité par nœud des réseaux considérés c.à.d. la quantité de données qu'un nœud du réseau peut transmettre vers le point d'accès au réseau filaire. Ils ont aussi introduit le problème de la configuration des transmissions (*transmissions configuration*) comme le nombre d'antennes déployés sur chaque nœud du réseau. Les auteurs ont démontré à par des simulations que la capacité du réseau sans fil maillé est dépendante du nombre d'antennes disponibles sur chaque nœud. Ils ont aussi démontré que la meilleure configuration de distribution d'antennes varie avec la valeur du rapport signal sur bruit (SNR).

Le travail présenté dans (Ben Salem et Hubaux, 2005) est le plus proche de notre proposition. Les auteurs ont développé un algorithme d'ordonnancement pour la maximisation de l'efficacité spectrale dans les réseaux sans fil maillés en prenant en compte le paramètre de l'équité. L'algorithme choisit les liens à activer à chaque case de temps en considérant la réutilisation spatiale. Il y a deux différences majeures entre cette proposition et la nôtre. Premièrement, les auteurs dans (Ben Salem et Hubaux, 2005) n'exploitent pas la technique MIMO au niveau de la couche physique du réseau sans fil considéré. La deuxième différence est que les auteurs considèrent la réutilisation spatiale seulement pour les liens suffisamment éloignés et qui n'interfèrent pas entre eux alors que dans notre travail la réutilisation spatiale est prise en compte même pour les liens qui sont proches et qui peuvent interférer entre eux. Ceci est dans le but de rester le plus près de la réalité malgré que l'interférence complique grandement la solution d'ordonnancement et limite les performances que le réseau peut atteindre.



## 3.2 Modèle du système

### 3.2.1 Modèle du réseau

Nous considérons un réseau sans fil maillé composé de  $N$  nœuds routeur. Nous supposons que la distance entre deux nœuds adjacents est égale à l'unité et que les  $N - 1$  premiers nœuds sont des routeurs mesh, tandis que le dernier nœud joue le rôle d'une passerelle vers le réseau filaire. Il est à noter que l'algorithme d'ordonnancement proposé est indépendant de la topologie du réseau. Cependant, pour des fins d'étude de performance et de présentation de l'algorithme, nous utiliserons deux types de topologies, à savoir la topologie chaîne et la topologie grille. Les nœuds sont indexés de 1 à  $N$  et le lien entre le nœud  $n_i$  et le nœud  $n_j$  porte l'indice  $i$ , c.-à-d. celui du nœud source. La fonction principale du réseau étudié consiste en l'acheminement du trafic généré par les clients, à travers les nœuds routeurs, vers le réseau filaire comme illustré dans la Figure 3.1. En effet, chaque nœud du réseau a un nombre de clients à servir en transférant leurs données au prochain nœud. Ainsi, chaque nœud routeur aura deux tâches à accomplir : envoyer les données qu'il reçoit de ses propres clients et transférer les données reçues des autres nœuds routeurs (c.à.d. celles générées par les clients servis par les autres nœuds). Ce modèle de trafic est équivalent à celui des réseaux ad hoc où les transmissions se font de proche en proche jusqu'à la destination.

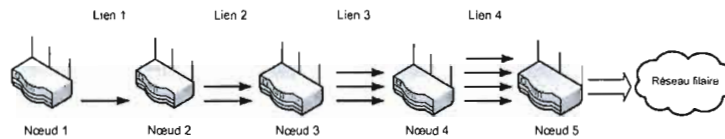


FIG. 3.1: Un réseau sans fil maillé de topologie chaîne avec  $N = 5$

Nous supposons l'utilisation de deux canaux radio orthogonaux comme le montre la Figure 3.2. Le fait d'avoir deux canaux qui sont orthogonaux nous permet d'éviter l'interférence en séparant les différents flux de données. En effet, le canal un est utilisé pour transmettre les données des clients vers les nœuds routeurs alors que le canal deux est employé pour faire la transmission des données entre les nœuds routeurs. Procédant

ainsi, nous éliminons l'interférence entre les deux types de trafic (clients - nœuds) et (nœuds - nœuds).

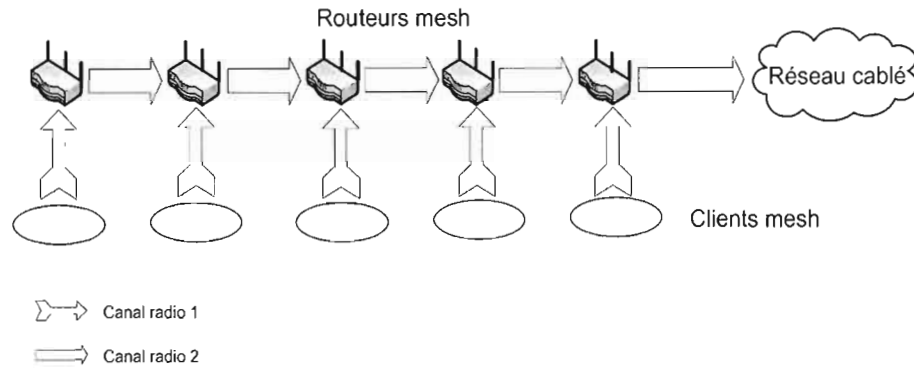


FIG. 3.2: Un réseau sans fil maillé de topologie chaîne avec  $N = 5$  servant plusieurs clients mesh en utilisant deux canaux

Notons par  $G_n$  le débit de données en bits/seconde entre le nœud  $n$  et ses clients. Dans la suite du document, nous pouvons appeler les clients qui transmettent des données aux même noeud routeur par groupe de client, ainsi dans la Figure 3.2 nous avons cinq groupes de clients. En plus, chaque nœud du réseau est supposé équipé de  $M$  antennes qu'il peut utiliser pour la transmission ou la réception. Les Figure, 3.1 et 3.3 illustrent le modèle du réseau pour les topologies chaîne et grille respectivement .

Il est à noter que pour la topologie grille, nous avons adopté arbitrairement un routage simple (voir Figure 3.3). Dans cette figure les arrêtes entre les noeuds représentent le routage choisi. Ainsi la fonction du routage assure un chemin entre chaque nœud du réseau et la passerelle. La Figure 3.3 montre l'ensemble de liens choisi par la fonction du routage pour la topologie grid à neuf noeuds. L'algorithme d'ordonnancement se base sur ce sous-ensemble de liens pour accomplir sa tâche.

Il est à préciser que les performances de l'algorithme d'ordonnancement sont étroitement liées à l'algorithme de routage employé au niveau de la couche réseau. Le développement d'une solution qui combine l'ordonnancement et le routage (*routing scheduling algorithm*) est possible. Une telle solution peut améliorer les résultats atteints par notre ordonnanceur mais elle ne fait pas l'objet de ce mémoire.

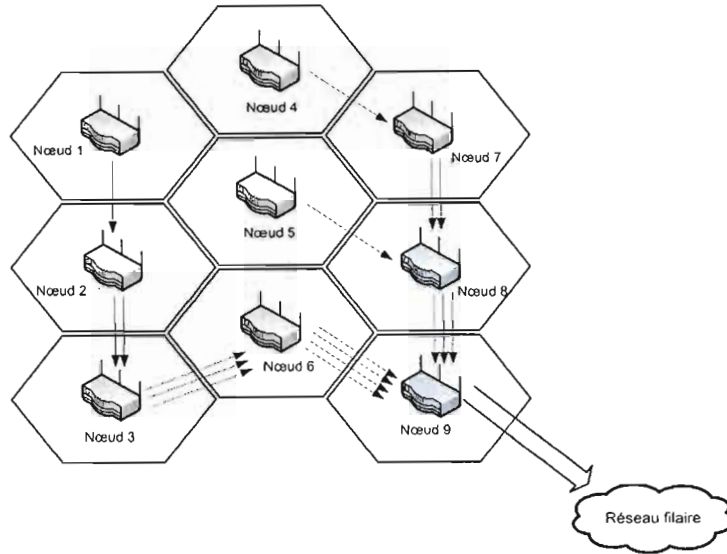


FIG. 3.3: Un réseau sans fil maillé de topologie grille avec  $N = 9$

### 3.2.2 Modèle d'accès au canal

Nous supposons que le temps est découpé en plusieurs intervalles de temps (dans la suite du document, nous pouvons désigner intervalles de temps par time slot ou TS). L'algorithme d'ordonnancement choisit à chaque intervalle de temps un ou plusieurs liens à activer. Nous entendons par l'activation d'un lien le transfert des données entre les deux nœuds qui forment le lien en question. Nous notons par  $r_n$  le nombre de TS nécessaire pour écouler la totalité du trafic d'un nœud routeur  $n$ . En effet, chaque lien  $n$ ,  $n = 1 \dots N - 1$  doit être activé suffisamment de fois pour permettre au nœud  $n$  de transmettre toutes les données reçues de ses prédécesseurs dans le réseau et aussi les données reçues de ses propres clients. Par exemple, dans la Figure 3.3, le lien huit (entre le nœud huit et le nœud neuf) doit être activé durant quatre TS, il a besoin de trois intervalles de temps pour transmettre les données de ses prédécesseurs (nœuds quatre, cinq et sept) et un TS pour transmettre les données de ses propres clients. On définit une trame comme l'ensemble d'intervalles de temps nécessaire à l'activation de tous les liens du réseau. Une trame est ainsi la somme de tous les  $r_n$ ,  $n = 1, \dots, N - 1$ . L'accès au canal par les différents nœuds se fait selon la technique d'accès multiple TDMA. Il

est important de noter que d'autres méthodes d'accès multiple, i.e. FDMA ou CDMA, peuvent aussi être utilisées avec des changements mineurs au niveau de l'algorithme d'ordonnancement. Nous considérons aussi la réutilisation spatiale qui nous donne la possibilité d'activer plus d'un seul lien durant le même TS quand le niveau d'interférence des liens activés le permet. La combinaison entre le TDMA et la réutilisation spatiale est connue sous le nom de STDMA (Accès multiple par division du temps et de l'espace).

### 3.2.3 Modèle d'interférence

Notons par  $A$  l'ensemble contenant les indices des liens activés dans le même TS. Pour chaque lien  $n$  dont l'indice appartient à l'ensemble  $A$ , nous considérons comme interférence toutes les autres transmissions faites durant le même TS. Donc le nœud routeur  $n$  subit une interférence produite par la globalité des liens dont les indices appartiennent à l'ensemble  $I = A \setminus \{n\}$ . Ainsi nous avons  $|A| - 1$  signaux interférents avec le signal envoyé sur le lien  $n$  où l'opérateur  $|\cdot|$  désigne la cardinalité d'un ensemble. Dans (Ben Salem et Hubaux, 2005) et (Jaafar *et al.*, 2007), qui sont les travaux les plus proches du nôtre, les auteurs ne supposent pas que toutes les transmissions activées en même temps agissent comme sources d'interférence. En effet, les transmissions considérées interférentes sont celles les plus proches spatialement du lien  $n$ . Certes, une telle supposition est avantageuse pour simplifier le problème d'ordonnancement ; cependant, elle est loin de la réalité comparativement à notre hypothèse où tous les autres liens activés sont des sources d'interférence à la présente transmission.

### 3.2.4 Modèle du canal

Les coefficients d'évanouissement du canal entre un nœud émetteur  $n$ ,  $n = 1 \dots N - 1$  et un nœud récepteur  $n_r$ ,  $n_r = 1, 2, \dots, N - 1$  sont représentés par la matrice  $\mathbf{H}_{n,n_r}$ . Cette dernière est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{H}_{n,n_r} = \sqrt{d_{n,n_r}^{-\beta}} \hat{\mathbf{H}}_{n,n_r} \quad (3.1)$$

avec  $\hat{\mathbf{H}}_{n,n_r}$ , une matrice de dimension  $M$  dont les éléments sont des variables complexes indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) qui suivent une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance unitaire (C'est une hypothèse largement utilisée dans les recherches reliées au domaine des communications sans fil),  $d_{n,n_r}$  est la distance entre les nœuds  $n$  et  $n_r$  et  $\beta$  est le coefficient de l'affaiblissement de la propagation (path loss) entre l'émetteur  $n$  et le récepteur  $n_r$  (c.-à-d. la perte en termes de puissance que le signal subie en parcourant la distance séparant l'émetteur du récepteur). Nous supposons que les coefficients d'évanouissement du canal pour le lien  $n$  ne varient pas pendant la durée d'un TS et qu'ils sont parfaitement connus au niveau du l'émetteur  $n$  et du récepteur  $n_r$ . Nous supposons aussi que la puissance d'émission disponible au niveau de l'émetteur  $n$  dans un TS est égale à  $P$ . Cette dernière est supposée identique pour tous les nœuds routeurs du réseau.

Le signal reçu au niveau du nœud  $n_r$  est donné par l'équation suivante :

$$\mathbf{y}_{n_r} = \sqrt{P} \mathbf{H}_{n,n_r} \mathbf{s}_n + \sum_{i \in I} \sqrt{P} \mathbf{H}_{i,n_r} \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_{n_r}, \quad (3.2)$$

où  $\mathbf{s}_n$  est un vecteur de dimension  $M$  représentant le signal transmis de l'émetteur  $n$  vers le récepteur  $n_r$ ,  $\mathbf{s}_i$  est un vecteur de dimension  $M$  qui désigne le signal interférent transmis par le nœud  $i$ . Le deuxième terme de l'équation calcule l'interférence subit par l'émetteur  $n$  en sommant tous les autres signaux envoyés pendant le même TS.  $\mathbf{w}_{n_r}$  est un vecteur de dimension  $M$  symbolisant le bruit additif. Les éléments du vecteur  $\mathbf{w}_{n_r}$  sont des variables complexes i.i.d.(indépendantes identiquement distribuées) suivant une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance unitaire.

Comme les coefficients d'évanouissement sont supposés parfaitement connus par l'émetteur et le récepteur, nous procédons à la décomposition de la matrice  $\mathbf{H}_{n,n_r}$  en ses valeurs singulières en utilisant le SVD (voir Section 2.1.1). Ainsi, la matrice  $\mathbf{H}_{n,n_r}$  pourrait être

écrite comme suit :

$$\mathbf{H}_{n,n_r} = \mathbf{U}_{n_r} \mathbf{\Sigma}_{n_r} \mathbf{V}_{n_r}^H, \quad (3.3)$$

Les symboles dans l'équation 3.3 gardent les mêmes significations et les mêmes propriétés que leurs symboles équivalents dans l'équation 2.7. En remplaçant la matrice  $\mathbf{H}_{n,n_r}$  par sa décomposition SVD dans l'équation (3.2) , cette dernière devient équivalente à l'équation suivante :

$$\mathbf{y}_{n_r} = \sqrt{P} \mathbf{U}_{n_r} \mathbf{\Sigma}_{n_r} \mathbf{V}_{n_r}^H \mathbf{s}_n + \sum_{i \in I} \sqrt{P} \mathbf{H}_{i,n_r} \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_{n_r}, \quad (3.4)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_{n_r} = \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{y}_{n_r} = \sqrt{P} \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{U}_{n_r} \mathbf{\Sigma}_{n_r} \mathbf{V}_{n_r}^H \mathbf{s}_n + \sum_{i \in I} \sqrt{P} \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{H}_{i,n_r} \mathbf{V}_{i+1} \mathbf{V}_{i+1}^H \mathbf{s}_i + \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{w}_{n_r}, \quad (3.5)$$

$$= \sqrt{P} \mathbf{\Sigma}_{n_r} \tilde{\mathbf{s}}_n + \sum_{i \in I} \sqrt{P} \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{H}_{i,n_r} \mathbf{V}_{i+1} \tilde{\mathbf{s}}_i + \tilde{\mathbf{w}}_{n_r}, \quad (3.6)$$

avec  $\tilde{\mathbf{s}}_n = \mathbf{V}_{n_r}^H \mathbf{s}_n$ ,  $\tilde{\mathbf{s}}_i = \mathbf{V}_{i+1}^H \mathbf{s}_i$  et  $\tilde{\mathbf{w}}_{n_r} = \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{w}_{n_r}$ . Il est important de noter ici que  $\mathbf{V}_{i+1}^H$  est la matrice sigulière résultante de la décomposition SVD du canal sur le lien entre les nœuds  $i$  et  $i+1$  ( $\mathbf{H}_{i,i+1} = \mathbf{U}_{i+1} \mathbf{\Sigma}_{i+1} \mathbf{V}_{i+1}^H$ ).

Cette décomposition est équivalente à transformer le canal entre les nœuds  $n$  et  $n_r$  en  $\nu_{n_r}$  sous-canaux parallèles. Nous employons aussi la technique d'optimisation dite Water filling (voir Section 2.1.2.3) dans le but de distribuer efficacement la puissance d'émission disponible au niveau du nœud émetteur sur les différents sous-canaux résultants de la décomposition SVD. La capacité maximale que le lien  $n$  peut atteindre entre le nœud émetteur  $n$  et le nœud récepteur  $n_r$  durant le TS  $t$  est donnée par l'équation suivante :

$$C(n, t) = \sum_{l=1}^{\nu_{n_r}} \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_n^{(l)2} P_n^{(l)}}{1 + \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^{\nu_i} P_i^{(k)} \|\mathbf{M}_{i,n_r}(l, k)\|_F^2} \right), \quad (3.7)$$

où  $\nu_{n_r}$  est le rang de la matrice  $H_{n,n_r}$ ,  $\sigma_n^{(l)}$  est le  $l^{\text{ième}}$  élément sur la matrice diagonale  $\Sigma_{n_r}$  qui représente, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, le gain du  $l^{\text{ième}}$  sous-canal parallèle.  $P_n^{(l)}$  est la portion de la puissance totale d'émission allouée par la technique Water Filling au  $l^{\text{ième}}$  sous-canal et  $\mathbf{M}_{i,n_r} = \mathbf{U}_{n_r}^H \mathbf{H}_{i,n_r} \mathbf{V}_{i+1}$  représente la matrice des interférences. Ici  $\|\cdot\|_F^2$  représente la norme de frobenius.

### 3.3 L'algorithme d'ordonnancement

#### 3.3.1 La formulation du problème d'ordonnancement

Nous proposons un algorithme d'ordonnancement qui vise à remplir les deux objectifs suivants :

1. L'équité entre les nœuds du réseau afin de garantir que tous les nœuds du réseau puissent acheminer jusqu'à la passerelle la même quantité de données pour leurs clients.
2. Tout en respectant l'objectif 1, notre algorithme améliore significativement le débit du réseau comparativement à un algorithme d'ordonnancement opportuniste basé sur le TDMA. Afin d'atteindre cet objectif, l'algorithme d'ordonnancement améliore l'utilisation de la bande passante disponible en essayant de considérer le plus souvent possible la réutilisation spatiale c.-à-d. l'activation de plusieurs liens durant le même TS.

Dans ce qui suit, nous allons dégager les tâches à réaliser et les conditions à respecter par l'algorithme d'ordonnancement afin d'atteindre les deux objectifs cités ci-dessus.

Nous avons supposé que chaque groupe de clients génère une quantité de données équivalente à  $G_n$  bits/seconde que le routeur  $n$  transmettera à son voisin. L'équité entre les différents nœuds routeurs du réseau est respectée si l'égalité suivante est vérifiée :

$$G_n = G_m \quad \forall n, m \in \{1 \dots N\}, \quad (3.8)$$

avec  $G_n = \frac{C_n}{T}$ ,  $T$  est le nombre de TS nécessaires dans une trame pour activer tous les liens du réseau, et  $C_n = \sum_{t=1}^T \frac{C(n,t)}{r_n}$  le débit moyen de transmission que le lien  $n$  peut atteindre pendant la durée d'un TS (il faut rappeler ici que  $r_n$  est le nombre de TS pendant lesquels le lien  $n$  doit être activé (voir section 3.2.2)). Il est à noter que si le lien  $n$  n'est pas activé pour transmettre durant le TS  $t$  alors  $C(n,t) = 0$ .

Dans ce document, le débit d'un réseau sans fil maillé est défini comme étant la somme de données en bits/seconde que l'ensemble des groupes de clients peuvent transmettre par le réseau jusqu'à la passerelle. Il est à noter que la quantité de données que chaque groupe de clients peut transmettre par le réseau est régulée par la quantité de données que leur nœud routeur a la capacité de transférer vers son voisin. Le débit du réseau est calculé comme suit :

$$R = \sum_{n=1}^{N-1} G_n = \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=1}^{N-1} C_n \quad (3.9)$$

Afin de maximiser le débit du réseau annoncé dans l'équation 3.9, l'algorithme d'ordonnancement doit assurer la tâche de trouver le meilleur scénario d'activation des liens du réseau pendant la durée d'une trame. En supposant une équité parfaite, la maximisation du débit du réseau est assurée si l'ordonnanceur parvient à faire le meilleur compromis entre les deux sous objectifs suivants :

1. Maximiser  $C_n$  pour chaque nœud routeur  $n$  du réseau, c.-à-d. la quantité de données que ce nœud peut transmettre sur le lien  $n$  pendant la durée d'un TS.
2. Minimiser la durée d'une trame  $T$ . En d'autres mots, maximiser l'exploitation de



la réutilisation spatiale.

Les deux sous objectifs cités ci-dessus sont opposés. En effet, la maximisation du  $C_n$  nécessite qu'à chaque TS le lien  $n$  soit activé seul afin d'éviter la perte en débit causé par l'interférence dû aux transmissions sur les autres liens activés durant le même TS. D'un autre côté, la minimisation de la durée d'une trame nous contraint à activer à chaque TS le plus de liens possible. Dans la section suivante, nous allons présenter en détail la procédure que notre algorithme d'ordonnancement emploie pour essayer de trouver le meilleur compromis.

Dans ce qui précède, nous avons supposé une équité parfaite afin de définir les sous-objectifs à atteindre en vue de maximiser le débit du réseau. Toutefois, un troisième sous-objectif s'impose en vue de respecter l'équité comme annoncé dans l'équation 3.8. Ce troisième sous-objectif est défini comme suit :

3- Assurer que  $C_n = C_m \quad \forall n, m \in \{1 \dots N\}$ .

Finalement, le problème d'ordonnancement se résume à la résolution des trois sous-objectifs cités auparavant. Dans la section suivante, nous allons détailler les différentes étapes menant à la résolution de ce problème d'ordonnancement.

### 3.3.2 L'algorithme d'ordonnancement proposé

Afin de simplifier l'illustration du fonctionnement de l'algorithme d'ordonnancement, nous considérons dans cette section la topologie chaîne seulement. Les mêmes étapes restent valables et peuvent être appliquées pour la topologie grille.

Comme nous l'avons vu dans la section 3.2.2, le temps est découpé en trame. Chaque trame est composé d'un nombre de slot de temps (TS) nécessaires à l'activation de tous les liens du réseau. Au début de chaque trame, l'algorithme commence par énumérer toutes les configurations possibles pour les liens du réseau. Une configuration est définie par les liens qu'elle active. La Figure 3.4 illustre les différentes configurations pour le

réseau de topologie chaîne avec  $N=5$  (Figure 3.1). Notons par  $N_c$  le nombre de configurations possibles pour un réseau donné. Dans notre exemple de la Figure 3.4, nous avons sept configurations possibles ( $N_c = 7$ ). Nous remarquons dans la Figure 3.4 qu'il y a deux types de configurations : le premier type consiste en des configurations qui activent seulement un seul lien. Nous notons ce genre de configuration dans la suite de ce document par WSR\_Configuration (Figure 3.4.a). Nous avons aussi des configurations qui activent plusieurs liens dans le but de tirer avantage de la réutilisation spatiale. Dans la suite, nous désignons ce deuxième type de configuration par SR\_Configuration (Figure 3.4.b).

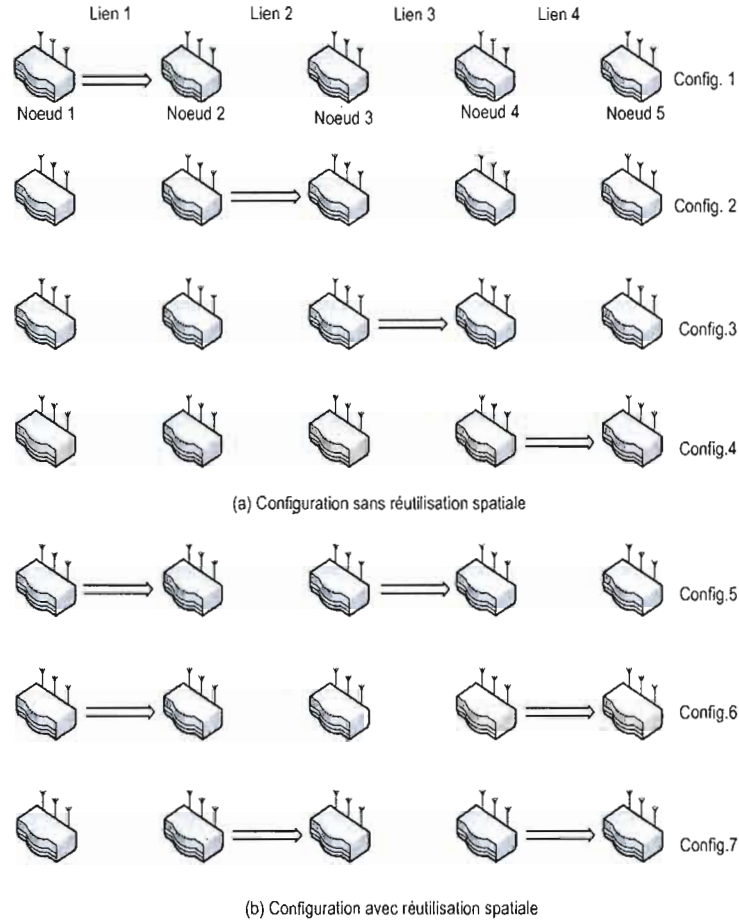


FIG. 3.4: Les configurations possibles pour un réseau de topologie chaîne avec  $N = 5$

À chaque intervalle de temps (TS)  $t$ , l'algorithme d'ordonnancement a la tâche de sélectionner une configuration parmi celles énumérées. Une fois que la configuration est

choisie, l'ensemble des liens  $y$  appartenant sont activés. Chaque lien  $n$  activé donne le droit au nœud routeur  $n$  de transmettre durant la période de l'intervalle de temps  $t$ . Il est à rappeler que chaque lien  $n$  doit être activé pendant  $r_n$  intervalles de temps. Dans le cas d'une topologie chaîne et comme chaque nœud  $n$  a exactement  $n - 1$  prédécesseurs, chaque lien  $n$  doit être activé pendant  $n$  TS ainsi  $r_n = n$ .

Il est évident qu'en termes de quantité de données transférée pendant un TS sur le lien  $n$  (désigné par  $C_n$  dans la section 3.3.1), l'activation de ce lien  $n$  dans une configuration du type WSR\_Configuration est meilleure que son activation dans une configuration de type SR\_Configuration. Ceci provient du fait que le débit du lien  $n$  dans une configuration du type SR\_Configuration souffre des effets négatifs de l'interférence. Procéder ainsi, c.-à-d. l'activation des liens dans des configurations du type SR\_Configuration nous permettra d'atteindre le premier sous-objectif cité dans la section précédente (la maximisation de  $C_n$  pour chaque nœud  $n$  du réseau) mais en même temps nous éloignera du deuxième sous-objectif (minimiser la durée d'une trame  $T$ ), car le fait d'activer juste un lien chaque TS conduit à avoir des durées de trame plus longues. En effet, pour atteindre ce deuxième sous-objectif, l'algorithme est tenu à sélectionner les configurations activant le plus grand nombre de liens, donc des configurations appartenant au type SR\_Configuration. Ce dernier type de configuration permet de minimiser la durée de la trame (désigné par  $T$  dans la section 3.3.1). Par conséquent, les deux sous-objectifs sont contradictoires, et donc la poursuite de l'un par l'algorithme conduit automatiquement à l'éloignement de la réalisation de l'autre. A chaque TS et dépendamment des valeurs des coefficients de l'évanouissement du canal, l'algorithme d'ordonnancement décide s'il est plus judicieux de sélectionner une configuration du type SR\_Configuration ou bien une configuration parmi les WSR\_Configurations pour qu'à la fin de l'activation de tous les liens, la valeur de  $G_n$  soit au maximum pour chaque lien  $n$  avec  $n = 1 \dots N$ .

Notons par  $T_{max}$ , le nombre de TS nécessaire dans une trame en supposant que l'algorithme d'ordonnancement considère seulement les configurations du type WSR\_Configuration, c.-à-d. à chaque TS l'algorithme sélectionne une configuration qui active un seul lien. Nous introduisons pour chaque lien  $n$ ,  $n = 1 \dots N$ , un ensemble nommé  $\mathbf{V}_n$ . Ce dernier

contient les indices des configurations qui activent le lien  $n$ . Par exemple, pour le lien un,  $V_1 = \{1, 5, 6\}$ . Nous définissons aussi pour chaque lien  $n$ ,  $n = 1 \dots N$ , un vecteur de dimension  $N_c$  que nous notons  $\mathbf{z}_n$ . Chaque élément ( $\mathbf{z}_n(n_c)$ ,  $n_c = 1, \dots, N_c$ ) de ce vecteur représente le débit maximal que le lien  $n$  peut atteindre lorsqu'il est activé dans la configuration  $n_c$ . Pour chaque intervalle de temps  $t$ , la valeur de l'élément  $\mathbf{z}_n(n_c)$  est calculé par l'équation 3.7. Nous introduisons aussi pour chaque lien  $n$ ,  $n = 1 \dots N$ , un vecteur de dimension  $(N_c - N + 1)$  noté  $\mathbf{g}_n$ . Chaque élément ( $\mathbf{g}_n(n_c)$ ,  $n_c = N, \dots, N_c$ ) de ce dernier vecteur correspond au gain en terme de débit que le lien  $n$  réalise lorsqu'il est activé dans la configuration  $n_c$  comparativement à son activation seule dans la configuration  $n$ . Ce gain est calculé comme suit :

$$\mathbf{g}_n(n_c) = \begin{cases} \frac{\mathbf{z}_n(n_c) + (n-1)\mathbf{z}_n(n)}{n(T_{max} - \mathbf{a}(n_c) + 1)} - \frac{\mathbf{z}_n(n)}{T_{max}} & \text{si } n_c \in V_n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.10)$$

où  $\mathbf{a}$  est un vecteur de dimension  $N_c$  et chaque élément  $\mathbf{a}(n_c)$  indique le nombre de liens activés dans la configuration  $n_c$ . Par exemple  $\mathbf{a}(6) = 2$ , ce qui indique que la configuration indexée six active deux liens, à savoir le lien un et le lien quatre. Il est à noter qu'après la sélection d'une configuration à la fin d'un slot de temps, les vecteurs  $\mathbf{V}_n$  doivent être mise à jour pour éliminer les configurations qui ne peuvent plus être choisies dans les prochains slot de temps. L'équation 3.10 est divisée en deux termes. Le premier terme calcule une estimation du débit moyen que le lien  $n$  pourra atteindre à la fin de la trame. Cette estimation est faite en supposant que le lien  $n$  est activé dans la configuration  $n_c$  pendant le TS en cours et qu'il sera activé seul dans les TS suivants c.-à-d. dans la configuration  $n$ . Le deuxième terme quant à lui calcule le débit moyen en supposant que le lien  $n$  est activé seul dans la configuration  $n$  pendant le TS en cours et qu'il sera activé aussi seul dans la configuration  $n$  pour les TS suivants dans la trame. Il est à noter que le dénominateur du premier terme  $(T_{max} - \mathbf{a}(n_c) + 1)$  représente le gain en termes de durée d'une trame lorsque le lien  $n$  est activé dans la configuration  $n_c$  comparativement à son activation dans la configuration  $n$ . Le but du calcul d'un élément ( $\mathbf{g}_n(n_c)$ ,  $n_c = 1, \dots, N_c$ )

est de savoir pour le TS en cours s'il est meilleur d'activer le lien  $n$  dans la configuration  $n_c$  avec d'autres liens ou l'activer seul dans la configuration  $n$ . Chaque élément  $\mathbf{g}_n(n_c)$  calculé peut avoir une valeur positive, négative ou nulle. En effet, une valeur positive de  $\mathbf{g}_n(n_c)$  indique qu'il est meilleur d'activer le lien  $n$  dans la configuration  $n_c$  alors qu'une valeur négative signifie qu'il est mieux de l'activer seul dans la configuration  $n$ . Une valeur nulle indique que la configuration  $n_c$  n'active pas le lien  $n$ .

Arrivée à cette phase, nous disposons pour chaque lien  $n$  du vecteur des gains réalisés pour les configurations appartenant à l'ensemble  $\mathbf{V}_n$ . Par exemple, pour le lien un, nous pouvons avoir le vecteur des gains suivant :  $\mathbf{g}_1 = \{0, 0, 0, 0, 1.3, 0, 0.7\}$ . Ce vecteur indique qu'activer le lien un dans la configuration cinq ou bien dans la configuration sept est meilleur que de l'activer dans la configuration 1. Nous devons décider maintenant pour chaque lien  $n$ ,  $n = 1 \dots N$ , de la meilleure configuration dans le cas où plusieurs configurations appartenant à l'ensemble  $\mathbf{V}_n$ , ont un gain positif. C'est la cas du lien un donné dans l'exemple précédent. Pour prendre cette décision, nous définissons un autre vecteur que nous notons  $\mathbf{b}$  de dimension  $N - 1$ . Chaque élément ( $\mathbf{b}(n), n = 1, \dots, N - 1$ ) de ce vecteur indique l'indice de la configuration qui donne le meilleur débit pour le lien  $n$ . Les éléments du vecteur  $\mathbf{b}$  sont calculés comme suit :

$$\mathbf{b}(n) = \begin{cases} n & \text{si } \min_{n_c} \mathbf{g}_n(n_c) = \max_{n_c} |\mathbf{g}_n(n_c)| \\ \arg \max_{n_c} |\mathbf{g}_n(n_c)| & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

Pour calculer chaque élément  $\mathbf{b}(n)$ ,  $n = 1 \dots N - 1$ , l'algorithme d'ordonnancement parcourt le vecteur  $\mathbf{g}_n$  à la recherche d'éléments positifs. Si de tels éléments sont trouvés alors l'élément  $\mathbf{b}(n)$  prend la valeur de l'indice de la configuration réalisant le meilleur gain. Sinon la meilleure configuration pour le lien  $n$  est tout simplement la configuration  $n$  et par conséquent, l'élément  $\mathbf{b}(n)$  prend la valeur  $n$ .

À ce stade, l'algorithme d'ordonnancement a pu définir pour chaque lien  $n$  la meilleure

configuration en termes de débit dans laquelle ce lien  $n$  doit être activé. Seulement, l'algorithme d'ordonnancement peut choisir une seule configuration à chaque TS. Cette configuration est celle qui offre le meilleur gain parmi toutes les configurations contenues dans le vecteur  $\mathbf{b}$ . Ainsi la configuration choisie par l'algorithme est celle qui maximise la valeur  $\mathbf{g}_n(\mathbf{b}(n))$  ( $\max_n \mathbf{g}_n(\mathbf{b}(n))$  avec  $n = 1 \dots N-1$ ). Certes, cette configuration choisie est la meilleure en termes de débit pour le lien  $n$  mais qu'en résulte-t-il pour les autres liens activés si la configuration choisie est du type SR\_Configuration ? La réponse à cette question est que si la configuration choisie par l'algorithme d'ordonnancement est du type SR\_ Configuration, alors elle n'est pas nécessairement la meilleure pour tous les liens activés en plus du lien  $n$  pour lequel elle a été choisie. Par exemple, si la configuration 5 est choisie pour le TS en cours parce que :  $\mathbf{g}_1(\mathbf{b}(1) = 5) = \max_n \mathbf{g}_n(\mathbf{b}(n))$ . Dans ce cas nous sommes sûrs que la configuration 5 (qui active les liens un et trois) est meilleure pour le lien un car elle lui offre le plus grand gain mais elle n'est pas nécessairement bonne pour le lien trois. Par conséquent, l'algorithme d'ordonnancement maximise le débit pour certains liens du réseau sans se préoccuper des autres. Ces derniers peuvent avoir à la fin d'une trame des débits moyens très médiocres. Cette situation nous laisse dire que l'algorithme d'ordonnancement, tel qu'il est actuellement, n'est pas encore équitable.

Dans ce qui suit, nous allons améliorer l'algorithme afin d'introduire le troisième sous-objectif annoncé dans la section précédente qui est l'équité, ce qui nous permettra d'assurer le même débit moyen pour les liens du réseau. Donc tous les nœuds routeurs du réseau vont pouvoir transmettre presque la même quantité de données durant une trame.

Afin de respecter l'équité nous devons ajouter une étape dans notre algorithme d'ordonnancement avant de sélectionner une configuration. L'algorithme doit s'assurer avant la sélection d'une configuration du type SR\_Configuration qu'aucun des autres liens activés ne sera fortement pénalisé. Pour ce faire, nous introduisons un dernier vecteur nommé  $\hat{\mathbf{b}}$  de dimension  $N - 1$  dont chaque élément ( $\hat{\mathbf{b}}(n), n = 1 \dots N - 1$ ) est calculé comme suit :

$$\hat{\mathbf{b}}(n) = \begin{cases} \mathbf{b}(n) & \text{si } z_n(\mathbf{b}(n)) = \min_{n' \in \{1, \dots, N-1\}} z_{n'}(\mathbf{b}(n)) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Pour calculer chaque élément  $\hat{\mathbf{b}}(n)$ , l'algorithme d'ordonnancement parcourt le vecteur  $\mathbf{b}$ . Pour chaque élément  $\mathbf{b}(n)$ ,  $n = 1 \dots N - 1$ , l'algorithme vérifie si le débit réalisé par le lien  $n$  sur la configuration  $\mathbf{b}(n)$  est le minimum par rapport aux débits des autres liens activés dans cette même configuration  $\mathbf{b}(n)$ . Dans le cas où cette vérification est positive, alors l'algorithme d'ordonnancement affecte à l'élément  $\hat{\mathbf{b}}(n)$  la valeur  $\mathbf{b}(n)$  sinon  $\hat{\mathbf{b}}(n)$  aura la valeur nulle. Ainsi, chaque élément  $\hat{\mathbf{b}}(n)$  contient l'indice d'une configuration qui remplit deux conditions : la première c'est que la configuration est meilleure pour le lien  $n$  et la deuxième condition c'est qu'elle ne pénalise pas fortement les autres liens activés. Cette deuxième condition découle du fait que le lien  $n$  réalise le plus petit débit dans la configuration  $\hat{\mathbf{b}}(n)$ , donc si cette dernière est la meilleure pour le lien  $\hat{\mathbf{b}}(n)$ , alors sûrement elle ne va pas pénaliser les autres liens qu'elle active. Par exemple si nous avons  $\mathbf{b}(1) = 5$  alors  $\hat{\mathbf{b}}(1)$  ne se verra affecter la valeur  $\mathbf{b}(1)$  seulement si  $z_1(5) \leq z_3(5)$  sinon  $\hat{\mathbf{b}}(1) = 0$ . Le passage du vecteur  $\mathbf{b}$  au vecteur  $\hat{\mathbf{b}}$  est fait dans le but de filtrer les configurations et garder seulement celles qui nous permettent de réaliser le troisième sous-objectif : l'équité. Finalement, l'algorithme d'ordonnancement sélectionne la configuration qui donne le meilleur gain parmi toutes les configurations présente dans le vecteur  $\hat{\mathbf{b}}$ . Cette configuration est celle qui maximise la valeur  $g_n(\hat{\mathbf{b}}(n))$ .

Une fois que la configuration est sélectionnée pour le TS courant, l'algorithme d'ordonnancement met à jour le nombre d'activation des liens (il est à rappeler que chaque lien  $n$  doit être activé pendant  $r_n$  TS) et procède à l'élimination des configurations qui n'ont plus besoin d'être sélectionnées dans les prochains TSs de la trame en cours. Par exemple, si après la mise à jour du nombre d'activation des liens, nous avons le lien quatre qui est activé dans quatre TS donc automatiquement les configurations quatre, six et sept sont éliminées et ne seront plus considérées par l'algorithme d'ordonnancement dans les



prochains TSs de la présente trame. Cette élimination est réalisée en mettant à jour les vecteurs  $\mathbf{V}_n$ . En effet, nous allons éliminer les indices des configurations de chaque vecteur  $\mathbf{V}_n$  si le lien  $n$  ne pourra plus être activé dans les prochains slots de temps. Il est à noter aussi que les vecteurs  $\mathbf{V}_n$  sont réinitialisés à leurs valeurs d'origine au début de chaque nouvelle trame.

Il est important de noter que si dans un TS et après le calcul de tous les vecteurs  $\mathbf{g}_n$  pour chaque lien  $n$ , nous avons tous les éléments  $\mathbf{g}_n(n_c), n = 1 \dots N, n_c = N \dots N_c$ , avec une des valeurs négatives. Alors, l'algorithme d'ordonnancement conclut que pendant ce TS, la réutilisation spatiale n'est pas avantageuse et qu'il faut considérer seulement les configurations qui activent un seul lien à la fois (Figure 3.4.a). Ainsi pendant ce TS, l'algorithme d'ordonnancement sélectionne d'une façon opportuniste la configuration  $n$  qui offre le meilleur débit parmi l'ensemble des configurations appartenant au type WSR\_Configuration.

Afin de faciliter la compréhension de l'ordonnanceur nous donnons dans la table 3.2 l'algorithme qui décrivent les différentes étapes pour la sélection de la meilleure configuration durant le time slot  $t$  (la table 3.1 donne les descriptions des différentes variables utilisées dans l'algorithme). Une trame est composée de plusieurs time slots. Ces time slots sont nécessaires à l'activation de tous les liens. Il est à rappeler que pour considérer que tous les liens du réseau sont activés, il faut que chaque lien  $n$  soit activé pendant  $r_n$  time slots (voir section 3.3.1). Au début de chaque trame, l'algorithme prend comme entrées le nombre de nœuds dans le réseau  $N$ , l'ensemble des indices de configurations  $C$  et le nombre de time slots nécessaires à l'activation de tous les liens du réseau en considérant seulement les WSR\_Configuration. Ce nombre est représenté par la variable  $T_{max}$ . Pour chaque time slots dans une trame, l'algorithme effectue les opérations suivantes : il commence par vérifier qu'il existe encore de liens qui nécessitent d'être activés. Si cette vérification est négative alors tous les liens sont activés et la trame est finie. Si par contre, cette vérification est positive alors nous avons besoin d'au moins un autre time slot. Dans ce cas, l'algorithme commence par récupérer les coefficients d'évanouissement du canal  $\mathbf{H}$  et les indices des configurations qui n'ont pas encore été annulées au cours



des précédents time slots de la trame en cours. Nous utilisons la variable  $C'$  pour désigner cet ensemble. Suite à cela, l'algorithme calcule pour chaque lien  $n$ , les vecteurs  $\mathbf{z}_n$  et  $\mathbf{g}_n$ . En se basant sur ce dernier vecteur, l'algorithme calcule les vecteurs  $\mathbf{b}$  et  $\hat{\mathbf{b}}$ . Ce dernier, contient les indices des meilleures configurations pour chaque lien  $n$  en considérant l'objectif de l'équité. L'algorithme sélectionne pour le time slot en cours la configuration qui offre le meilleur gain parmi celles présentes dans ce dernier vecteur  $\hat{\mathbf{b}}$ . Les liens appartenant à cette configuration sont activés pendant le time slot en cours. Finalement, l'algorithme met à jour le nombre d'activation de liens et élimine les configurations qui ne peuvent plus être choisies durant la présente trame (c.-à-d. celles qui activent un lien  $n$  déjà activé pendant  $r_n$  time slots) et met à jour l'ensemble  $C'$  qui va être utilisé dans le prochain time slot. L'algorithme répète les mêmes étapes pour les time slots suivants de la même trame jusqu'à ce que tous les liens du réseau soient activés. Une fois que tous les liens sont activés, l'algorithme passe à la trame suivante. Il est à noter qu'au premier time slot d'une trame, l'ensemble  $C'$  contient toutes les configurations du réseau (c.-à-d.  $C'=C$ ).

TAB. 3.1: Les variables utilisées dans l'algorithme d'ordonnement

---

$N$	nombre de noeuds dans le réseau.
$T_{max}$	nombre de slots nécessaires à l'activation de tous les liens sans considérer les configurations du type SR_Configuration.
$r_n$	un vecteur qui contient le nombre de fois que chaque lien $n$ doit être activé pendant une trame.
$f$	un vecteur qui contient le nombre de fois que le lien a été déjà activé pendant la trame en cours.
$C$	un ensemble contenant les indices des configurations énumérées au début d'une trame
$C'$	un ensemble contenant les indices des configurations qui ne sont pas encore éliminées.
$T$	le nombre de time slots déjà utilisés dans la trame en cours.
$V_n$	un vecteur contenant les indices des configurations qui activent le lien $n$ .
$z_n$	un vecteur qui contient le débit maximal que le lien $n$ peut atteindre sur chaque configuration.
$g_n$	un vecteur qui contient le gain du lien $n$ pour les différentes configurations.
$\hat{b}$	un vecteur qui contient les indices des meilleures configurations pour les liens des réseau sans considérer l'équité.
$config$	l'indice de la configuration choisie pour le slot de temps $t$ .

---

TAB. 3.2: L'algorithme d'ordonnancement

---

Entrées :	$N ; T_{max} ; C ; \mathbf{f} ; \mathbf{V}_n ; \mathbf{r}_n ;$
Initialisation :	$T \leftarrow 0$
\\Pour chaque trame	
	<b>Tant qu'il existe</b> $\mathbf{f}[n]$ tel que $(\mathbf{f}[n] \neq \mathbf{r}[n])$ alors
\\Pour chaque slot de temps	
Étape 1 :	récupérer la matrice $\mathbf{H}$ et l'ensemble $\bar{C}$ ;
Étape 2 :	<b>Pour</b> $i \in \{1 \dots N - 1\}$
	calculer $\mathbf{z}_n$ selon l'équation 3.7 et $\mathbf{g}_n$ selon l'équation 3.10
	<b>fin pour</b>
Étape 3 :	calculer $\mathbf{b}$ selon l'équation 3.11
Étape 4 :	calculer $\hat{\mathbf{b}}$ selon l'équation 3.12
Étape 5 :	calculer $config = \max_n \mathbf{g}_n(\hat{\mathbf{b}}(n))$ avec $n = 1 \dots N-1$
Étape 6 :	Pour $i \in \{1 \dots N - 1\}$ si $(config \in V_n)$ alors $\mathbf{f}[n] \leftarrow \mathbf{f}[n] + 1$ si $(\mathbf{f}[n] == \mathbf{r}[n])$ alors $\bar{C} = \bar{C} \setminus V_n$
Étape 7 :	$T \leftarrow T + 1$
	<b>Fin tant que</b>

---

## CHAPITRE IV

### SIMULATIONS ET RÉSULTATS

Dans ce dernier chapitre nous testons par les simulations les performances atteintes par notre algorithme d'ordonnancement et vérifions qu'il répond aux objectifs fixés, à savoir le respect de l'équité entre les nœuds du réseau et l'amélioration du débit réseau comparativement à un algorithme d'ordonnancement basé sur le TDMA. Les simulations sont réalisées avec le logiciel MATLAB en se basant sur le modèle du système décrit dans le chapitre précédent. Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons la méthodologie de simulation ensuite nous présentons et discutons les résultats de simulations. Ces derniers montrent que l'algorithme d'ordonnancement présenté atteint ses objectifs et qu'il réalise des performances très proches de celles réalisées par la recherche exhaustive qui représente la solution optimale du problème d'ordonnancement.

#### 4.1 Méthodologie de simulation

##### 4.1.1 Logiciel de simulation

Les simulation sont réalisées par le logiciel MATLAB dans sa version R2007b. Ce logiciel est souvent utilisé dans la recherche sur la communication sans fil, notamment lorsque les travaux au niveau de la couche physique et la couche MAC.

##### 4.1.2 Paramètres de simulation

Nous nous basons sur le modèle du système présenté dans le chapitre précédent. Nous utilisons des réseaux de topologie chaîne ou grille en changeant le nombre de nœuds et

aussi le nombre d'antennes sur chaque nœud selon les besoins de la simulation. Nous utilisons un canal avec des coefficients d'évanouissement qui sont des variables complexes indépendantes identiquement distribuées (i.i.d) qui suivent une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance unitaire. Nous supposons un coefficient d'affaiblissement de la propagation noté  $\beta$  ( voir section 3.2.4) égale à 3,5. Cette valeur est la plus utilisée dans les recherches sur la communication sans fil car elle représente le meilleur compromis entre l'affaiblissement de la propagation dans les environnements couverts et à l'extérieur.

#### 4.1.3 Méthode de simulation

Nous évaluons les performances de l'algorithme d'ordonnancement présenté en termes de débit réseau c.-à-d. la quantité de données en bits/seconde que l'ensemble des nœuds routeurs peuvent transmettre de leurs clients jusqu'à la passerelle. Nous nous intéressons aussi à la vérification que notre algorithme d'ordonnancement a atteint son objectif en termes d'équité. Nous comparons par des simulations la solution d'ordonnancement proposée avec un algorithme d'ordonnancement opportuniste basé sur le TDMA. Ce dernier considère seulement les configurations du type WSR\_Configuration et sélectionne à chaque TS la configuration qui active le lien ayant le plus haut débit.

Nous comparons aussi les performances en termes de débit atteint par notre solution d'ordonnancement avec celles d'un algorithme d'ordonnancement basé sur une recherche exhaustive et théorique. L'algorithme basé sur la recherche exhaustive qui représente la solution optimale non pratique (à cause de sa complexité) à notre problème d'ordonnancement suppose une connaissance préalable parfaite au début de chaque trame de tous les coefficients d'évanouissement des sous-canaux pour tous les intervalles de temps (TS) de la trame. Donc la différence entre notre solution d'ordonnancement et celle basée sur une recherche exhaustive est que cette dernière sélectionne une configuration dans le TS courant en prenant en compte les futurs coefficients d'évanouissement dans les prochains TS de la trame alors que notre algorithme sélectionne une configuration en connaissant seulement les coefficients d'évanouissement du canal pour le TS courant.

## 4.2 Résultats numériques et discussion

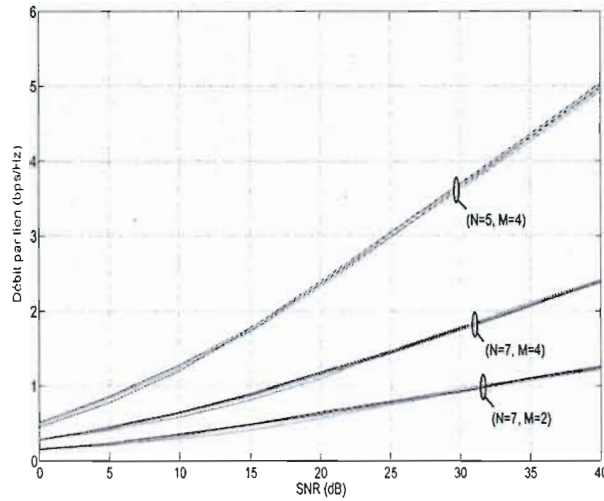


FIG. 4.1: Débit par lien vs. SNR pour une topologie chaîne

La première phase des simulations consiste à vérifier l'équité. Dans la Figure 4.1, nous traçons le débit par lien du réseau en faisant varier la valeur du rapport signal sur bruit (SNR). Nous considérons trois réseaux de topologie chaîne. Le premier réseau comprend cinq nœuds ( $N = 5$ ) où chaque nœud est équipé de quatre antennes ( $M = 4$ ). Le deuxième réseau considère sept nœuds ( $N = 7$ ) équipés chacun de deux antennes ( $M = 2$ ) alors que le troisième réseau suppose aussi sept nœuds ( $N = 7$ ) équipé chacun de quatre antennes ( $M = 4$ ). Nous remarquons que les liens appartenant au même réseau atteignent presque le même débit (Les différentes courbes pour chaque réseau sont presque superposées). En effet, l'écart type entre les débits des liens du même réseau est plus petit que 0,02 bps/Hz. Cette valeur est très acceptable en considérant les valeurs des débits qui varient entre 0,2 et 5 bps/Hz dans les différents types de réseau présents dans Figure 4.1. Nous pouvons exprimer le niveau de l'équité en introduisant l'écart-type relatif qui est le rapport entre l'écart-type et la moyenne des débits à un certain niveau du rapport signal sur bruit (SNR). Dans la Figure 4.1 et pour le réseau constitué de cinq nœuds (les courbes ), nous avons une moyenne des débit égale à 2,34 à un SNR = 20 dB .

Dans ce cas, l'écart-type relatif est égale à  $0,02/2,34 = 0,00854 = 0,854\%$ . Cela prouve que le niveau d'équité assuré par l'algorithme d'ordonnancement répond au troisième sous-objectif annoncé dans la section 3.3.1.

Nous constatons aussi sur la Figure 4.1 que le débit atteint par les liens d'un réseau comportant cinq nœuds est meilleur que celui réalisé par les liens du réseau à sept nœuds. Ce constat est justifié par le fait qu'une bande radio partagée par plus de liens résulte en un débit moins élevé par lien.

Toujours sur la même Figure 4.1 et en se focalisant cette fois-ci sur le réseau à sept nœuds, nous remarquons que le débit par lien atteint par les nœuds équipés de quatre antennes est le double du débit atteint par les nœuds équipés de deux antennes. Ceci démontre que l'algorithme proposé tire avantage des caractéristiques des systèmes MIMO cités dans (Duman et Ghayeb, 2007)(Goldsmith, 2005) à savoir que la capacité augmente linéairement avec le nombre d'antennes sur chaque nœud. Cet objectif n'est pas évident à atteindre avec un algorithme d'ordonnancement qui considère la réutilisation spatiale car il faut éviter les effets néfastes de l'interférence. Notre algorithme d'ordonnancement profite de cet avantage malgré qu'il opère dans un environnement avec interférences. Ceci est réalisé en exploitant la réutilisation spatiale quand le niveau d'interférence est bas. Dans les intervalles de temps où le niveau d'interférence est haut, l'algorithme d'ordonnancement se contente de choisir les configurations du type WSR\_Configuration et active un seul lien.

La Figure 4.2 compare l'algorithme d'ordonnancement proposé avec un algorithme opportuniste basé sur le TDMA. Dans cette phase de simulation, nous avons employé trois types de réseaux. Un premier réseau de topologie chaîne avec sept nœuds (les deux courbes au milieu), un autre réseau de topologie grille avec onze nœuds (les deux courbes les plus hautes dans la figure) et un troisième réseau de topologie chaîne avec neuf nœuds (les deux courbes les plus bas sur la figure). Les nœuds dans les différents réseaux sont équipés de quatre antennes. La Figure 4.2 trace le débit réseau pour les différents types de réseau considérés pour les différentes valeurs du SNR. Nous remarquons que notre

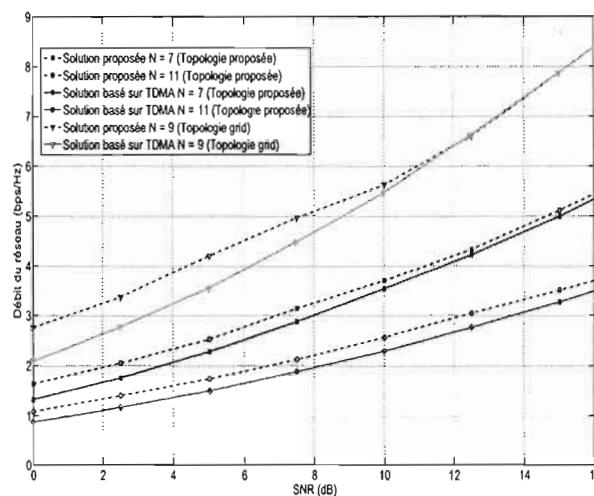


FIG. 4.2: Le débit réseau vs. SNR pour la topologie chaîne et la topologie grille

l'algorithme d'ordonnancement réalise un meilleur débit réseau comparativement à l'algorithme TDMA et ceci pour les différents types de réseaux considérés.

Nous constatons qu'en dépassant la valeur  $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ , l'écart entre les performances atteintes par l'algorithme présenté et celles de l'algorithme TDMA se ressert. Cet écart finit par disparaître pour la topologie grille pour des grandes valeurs de SNR ( $\text{SNR} \geq 11 \text{ dB}$ ). La baisse des performances constatée au niveau de notre algorithme d'ordonnancement pour les valeurs de SNR supérieures à 10 dB est justifiée comme suit : l'influence négative de l'interférence sur les transmissions devient plus importante avec des valeurs de SNR plus élevées. L'interférence est un élément qui nous empêche de tirer avantage de la réutilisation spatiale en diminuant les performances des configurations du type SR\_Configuration. Donc, notre algorithme a tendance à sélectionner de plus en plus des configuration du type WSR\_Configuration. Par conséquent, le comportement de notre algorithme d'ordonnancement est de plus en plus proche de celui de l'algorithme opportuniste basé sur le TDMA.

En se concentrant sur la topologie chaîne (les quatre courbes du bas), nous observons que pour une valeur fixe de SNR, l'écart entre l'algorithme proposé et l'algorithme basé



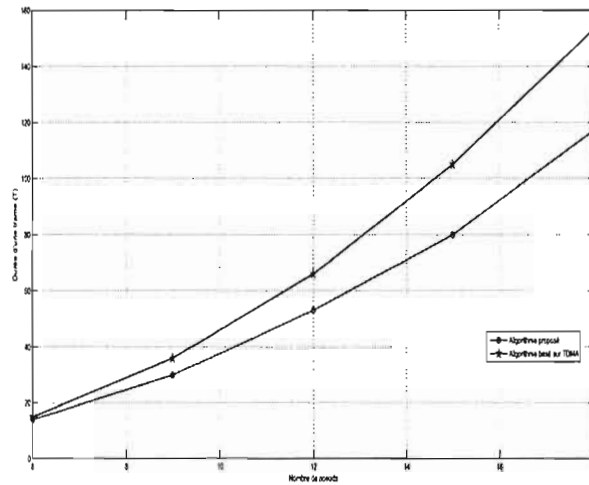


FIG. 4.3: Nombre de TSs dans une trame vs. le nombre de nœuds dans le réseau pour  $SNR = 10$

sur le TDMA pour le réseau à onze nœuds est plus grand que celui pour le réseau à sept nœuds. Ce résultat était prévisible car en développant notre algorithme, nous avons constaté qu'avec l'augmentation du nombre de nœuds composant le réseau, nous avons plus de configurations de type `SR_Configuration`. Ces dernières, permettent à notre algorithme de tirer un plus grand avantage de la réutilisation spatiale ; Cela explique que l'écart entre les deux algorithmes d'ordonnancement est plus grand pour le réseau ayant plus grand nombre de nœuds. Nous avons aussi remarqué qu'en augmentant le nombre de nœuds du réseau, nous avons de plus en plus de configurations qui activent des liens spatialement éloignés. Cette caractéristique donne à notre algorithme la capacité de résister à l'interférence. Ce qui justifie la présence de l'écart pour la topologie chaîne à onze nœuds même pour les grandes valeurs de SNR.

La Figure 4.3 montre le gain en termes de la durée d'une trame réalisé par notre algorithme proposé. La comparaison est faite toujours avec un algorithme basé sur le TDMA. Nous constatons que notre algorithme d'ordonnancement optimise le temps nécessaire à l'activation de tous les liens du réseau en utilisant le plus souvent possible les configurations du type `SR_Configuration`. L'écart entre les deux algorithmes augmente avec l'aug-

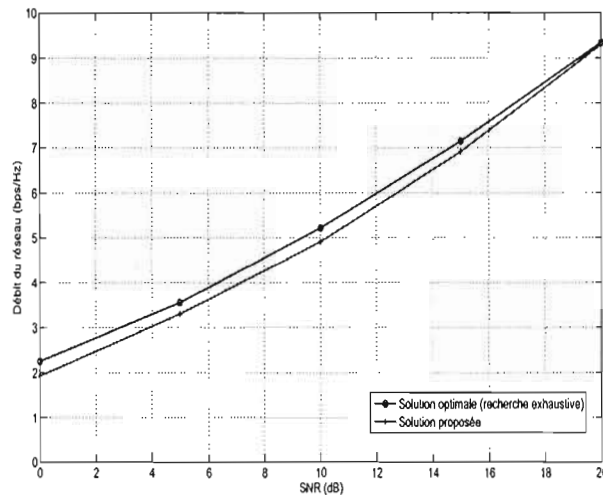


FIG. 4.4: Le débit réseau vs. SNR ( $N = 5$  and  $M = 4$ )

mentation du nombre de nœuds du réseau. Cette tendance est simplement expliquée par le fait qu'avec plus de nœuds, nous avons plus de configuration du type SR\_Configuration. Donc l'algorithme permet de diminuer la durée d'une trame.

Dans la dernière étape des simulations, notre algorithme d'ordonnancement est comparé à la solution optimale qui utilise la recherche exhaustive. Il est à noter que cette solution optimale représente une borne théorique maximale aux performances que nous pouvons atteindre pour le problème d'ordonnancement et qu'elle est pratiquement irréalisable. La Figure 4.4 montre que les performances en termes de débit réseau réalisées par notre solution d'ordonnancement s'approchent de celles atteintes par la solution optimale malgré que la complexité algorithmique de notre solution d'ordonnancement est nettement plus basse que celle de la solution optimale.

## CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté un algorithme d'ordonnancement pour les réseaux sans fil maillés basés sur des liens MIMO. Nous avons démontré que l'algorithme d'ordonnancement a atteint ses objectifs qui sont : la garantie de l'équité entre les nœuds et l'amélioration du débit réalisé par le réseau comparativement à un algorithme d'ordonnancement opportuniste basé sur le TDMA.

Dans le premier chapitre de ce document, nous nous sommes intéressés à un nouveau genre de réseau sans fil qui sont les réseaux sans fil maillés. Nous avons précisé que dans ce genre de réseau sans fil, les communications entre les routeurs mesh sont faites par des liens radio et que cette spécificité rend les WMNs plus facile à installer, modifier et maintenir que les réseaux sans fil traditionnel. Cette même spécificité permet de réduire les coûts d'installation de l'infrastructure de communication pour différents type d'applications. Nous avons aussi précisé les avantages apportés par les WMNs comme la réduction de l'interférence et l'amélioration de la couverture radio. Les différentes applications qui peuvent utiliser les WMNs comme infrastructure de communication ont été présentées. Nous avons vu que les WMNs sont déjà utilisés dans des domaine de première importance comme les services de secours et de la santé. Les efforts de standardisation survolés à la fin du premier chapitre promettent un futur brillant pour les WMNs. Nous voulons ici attirer plus l'attention sur le standard IEEE 802.16a qui peut simplifier grandement et réduire considérablement le coût de l'accès sans fil large bande à Internet pour les professionnels et les résidents, notamment dans les milieux urbains.

Le deuxième chapitre était consacré aux systèmes MIMO. La capacité de ces systèmes calculée en utilisant les résultats de la théorie de l'information ont démontré l'amélioration significative que les MIMO introduisent par rapport aux systèmes traditionnels appelés SISO. Nous avons constaté par la présentation de différentes équations de la capacité des systèmes MIMO que la valeur de cette dernière dépend des informations disponibles sur le canal au niveau de l'émetteur et le récepteur. Dans le cas où cette information est

disponible au niveaux des deux bouts de la communication, l'utilisation de la méthode SVD pour la décomposition du canal en une suite de sous-canaux parallèles et l'emploi du Water Filling comme algorithme d'optimisation pour la répartition de la puissance d'émission sur les différentes sous-canaux constituent la solution optimale qui permet d'atteindre la capacité. Nous avons vu dans la dernière partie du deuxième chapitre que les WMNs peuvent tirer avantage des systèmes MIMO pour améliorer leurs débit et servir un plus grand nombre de clients avec une bonne qualité de service notamment quand le réseau WMN est utilisé comme une dorsale d'accès sans fil. Les MIMO améliorent aussi la portée radio des WMNs et permettent aux routeurs mesh d'économiser d'avantage leurs énergies.

Nous pensons qu'un WMN basé sur des liens MIMO est très efficace comme infrastructure de communication dans les milieux urbains. En effet, dans ces milieux les effets négatifs de l'évanouissement et de l'interférence sont accentués. Les bâtiments, les voitures et autres obstacles amplifient le phénomène de l'évanouissement. D'un autre côté, la quantité de données à transférer est beaucoup plus importante qu'ailleurs et un très grand nombre de transmissions peuvent être réalisés simultanément dans une zone assez petite. Cette situation conduit à accroître les effets indésirables de l'interférence. Une combinaison entre les WMNs et les MIMO permet d'exploiter le phénomène de l'évanouissement pour augmenter le débit du réseau et utiliser les chemins redondants disponibles pour réduire l'interférence.

L'algorithme d'ordonnancement a été présenté dans le chapitre 3. Les simulations ont montré que l'ordonnanceur a atteint ses objectifs et qu'il réalise des performances meilleures que celles réalisées par l'algorithme d'ordonnancement opportuniste basé sur le TDMA. En le comparant avec la solution optimale et théorique basée sur la recherche exhaustive, nous avons constaté que le débit atteint par l'ordonnanceur est très proche de celui réalisé par la recherche exhaustive malgré que d'un point de vue algorithmique, notre ordonnanceur est beaucoup moins complexe que la solution optimale. En outre, le développement de l'algorithme d'ordonnancement nous a permis de tirer quelques conclusions qui nous énumérons comme suit :

1. Dans un réseau WMN, il est beaucoup plus intéressant pour avoir des bonnes performances globales d'assurer l'équité au lieu de chercher à maximiser le débit d'un ensemble de liens au détriment du reste de liens. En effet, même si un ensemble de nœuds atteint des débits très élevés, les liens défavorisés vont composer des goulots d'étranglements qui réduisent considérablement les performances du réseau. Par conséquent, le meilleur choix est d'essayer d'augmenter au mieux le débit de tous les liens tout en assurant l'équité.
2. La réutilisation spatiale dans un réseau WMN, (où un algorithme d'ordonnement capable d'estimer à chaque slot de temps l'impact de l'interférence sur les liens est mis en œuvre) donne des meilleures performances par rapport au cas où cette réutilisation spatiale n'est pas considérée. Cette règle est valable jusqu'à un certain niveau de signal sur bruit (SNR). Ce niveau dépend du nombre de nœuds dans le réseau et aussi de l'architecture de celui-ci. La réutilisation spatiale n'est plus favorable pour les performances et ne doit plus être considérée au-delà de ce niveau de SNR.

Dans ce qui suit, nous donnons des propositions pour des futurs travaux en relation avec notre travail :

1. La sélection d'antennes (antennas selection) : dépendamment du niveau de l'interférence à chaque slot de temps, il est parfois plus intéressant pour les performances globales du système d'utiliser seulement un sous-ensemble d'antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur (Sanayei et Nosratinia, 2004)(Molisch *et al.*, 2005)(Blum et Winters, 2002)(Ghrayeb et Duman, 2003)(Gorokhov *et al.*, 2003). Les antennes non utilisées peuvent être exploitées pour éliminer les interférences (Sakaguchi et Ono, 2007) et augmenter encore plus le débit du réseau.
2. Étudier le cas où les coefficients du canal ne sont pas connus au niveau de l'émetteur : Dans ce cas d'autres techniques que le SVD peuvent être utilisées comme la méthode du forçage à zéro (Zéro Forcing) (Paulraj *et al.*, 2008). Il est intéressant de voir le comportement de notre algorithme dans ce cas et regarder s'il donne résultats meilleurs que l'algorithme opportuniste basé sur le TDMA.

3. Proposer une étude analytique dans le but de trouver des équations qui précisent les conditions des lesquelles le fait de considérer la réutilisation spatiale est avantageux.
4. Proposer un algorithme d'ordonnancement qui prend en compte le routage employé au niveau de la couche réseau. Nous pensons que cette solution pourra améliorer d'avantage le débit du réseau.

## BIBLIOGRAPHIE

- AIIRMESH COMMUNICATIONS (2009). <http://www.aiirmesh.com>.
- AKYILDIZ, I. F., WANG, X. et WANG, W. (2005). Wireless mesh networks : a survey. *Elsevier Comput. Netw. J*, 47:445–487.
- BEJERANO, Y., HAN, S.-J. et LI, L. E. (2004). Fairness and load balancing in wireless lans using association control. *Dans MobiCom '04 : Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 315–329, New York, NY, USA. ACM.
- BEN SALEM, N. et HUBAUX, J.-P. (2005). A Fair Scheduling for Wireless Mesh Networks. *Dans The First IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*.
- BLUM, R. et WINTERS, J. (2002). On optimum mimo with antenna selection. *Communications Letters, IEEE*, 6(8):322–324.
- BRAY, J. et F STURMAN, C. (2000). *Bluetooth 1.1 : Connect Without Cables*. Prentice Hall PTR.
- CUWIN COMMUNITY WIRELESS SOLUTIONS (2006). <http://cuwireless.net/>.
- DRIOUECH, A., AJIB, W. et DRIOUCH, E. (2009). An efficient scheduling schemes for mimo wireless mesh networks with fairness constraints. *IEEE Symposium on Computers and Communications, 2009. ISCC 2009*.
- DUMAN, T. et GHRAÏEB, A. (2007). *Coding for MIMO Communication Systems*. John Wiley and Sons.
- FOSCHINI, G. J. (1996). Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Tech. J.*, pages 41–59.
- FOSCHINI, G. J. et GANS, M. J. (1998). On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wirel. Pers. Commun.*, 6(3):311–335.

- GAMBIROZA, V., SADEGHI, B. et KNIGHTLY, E. W. (2004). End-to-end performance and fairness in multihop wireless backhaul networks. *Dans MobiCom '04 : Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 287–301, New York, NY, USA. ACM.
- GESBERT, D., SHAFI, M., SHAN SHIU, D., SMITH, P. J. et NAGUIB, A. (2003). From theory to practice : an overview of mimo space-time coded wireless systems. 21:281–203.
- GHRAYEB, A. et DUMAN, T. (2003). Performance analysis of mimo systems with antenna selection over quasi-static fading channels. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 52(2):281–288.
- GNU ZEBRA (2005). <http://www.zebra.org/>.
- GOLDSMITH, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- GOROKHOV, A., GORE, D. et PAULRAJ, A. (2003). Receive antenna selection for mimo spatial multiplexing : theory and algorithms. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 51(11):2796–2807.
- HEKMET, R. (2006). *Ad-hoc Networks : Fundamental Properties and Network Topologies*. Springer.
- HOSSAIN, E. et LEUNG, K. (2008). *Wireless Mesh Networks Architectures and Protocols*. Springer.
- IEEE 802.11 TASK GROUP (2007). Ieee standard for information technology – telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – specific requirements – part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, ieee std 802.11–2007.
- IEEE 802.11 TASK GROUP N (2008). Ieee standard for information technology – telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – specific requirements – part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, ieee p802.11n/d7.0.